



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

**Facultad de Ciencias e Ingeniería
Departamento de Tecnología
Ingeniería Geológica**

**Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniera
Geóloga**

Tema:

**«Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas
potencialmente inestables a movimientos de masa en el
área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas»**

ELABORADO POR:

- **Br. Katherine Valeria Gutiérrez Hernández.**

TUTOR: PhD. Carlos Ariel Rubí Téllez

ASESOR: MSc. Francisco Javier Espinoza Martínez

Julio, 2019

Dedicatoria

Primeramente, a Dios quien es el forjador de mi camino, quien me acompaña y me levanta en mi continuo tropiezo.

A mi madre Damaris, por creer en mí en momentos que ni yo lo hacía, por su amor y sacrificio durante todos estos años.

A mi Querida Rosa, quien hoy no está conmigo físicamente, pero en mi corazón vive eternamente, tú fuiste fuente de admiración y de alegría para mi vida y aunque la tuya se apagó, tu recuerdo es la luz que ilumina mi camino y guía mis pasos.

Agradecimientos

Inicialmente a Dios fuente de amor y sabiduría, por acompañarme y no desampararme en el transcurso de mi vida.

A mi familia, por apoyarme y enseñarme a salir adelante sin importar lo difícil que sea, gracias por su apoyo incondicional y por instruirme valores que me han hecho mejor persona, especialmente a mi madre quien es mi motivación para salir adelante.

A mis mejores amigos Lidamarys, David y Fley quienes me acompañaron durante toda mi etapa universitaria y fueron un gran apoyo para mí.

A mi tutor, el profesor Carlos Rubí quien con sus consejos, sugerencias y correcciones me ayudo a culminar de una manera exitosa este documento, gracias por su tiempo, dedicación y compromiso en mi trabajo, gracias por transmitirme su conocimiento y fortalecer los míos.

A mi asesor, el profesor Francisco Espinoza quien fue pieza fundamental para la culminación de mi monografía, gracias por su tiempo, comentarios, paciencia y dedicación en mi trabajo, gracias por enseñarme a ser una mejor profesional y compartir su saber.

Al instituto de geología y geofísica por haberme permitido realizar mi trabajo monográfico con ellos y apoyarme con gastos, equipos y materiales para el desarrollo de este documento, a todo el personal docente y administrativo quienes me apoyaron brindándome consejos, sugerencias, opiniones y todo lo que necesité, gracias Ing. Wilmor Arce e Ing. Enrique Navarro por acompañarme en mi etapa de campo, al tecnico Francisco Vázquez por apoyarme con la realización de secciones delgadas y ensayos geotécnicos, al MSc. Horacio Ulloa por sus valiosos aportes y supervisión en el análisis

geotécnico, además de sus comentarios y sugerencias para la mejora de este documento.

A mis docentes en general por transmitirme su conocimiento durante la carrera universitaria, por su paciencia, entrega, compromiso y por enseñarme valores para convertirme en una buena profesional, gracias por ayudarme a culminar con esta etapa de mi vida.

Aval

Resumen

En la región occidental de Nicaragua se localiza una cuenca de sedimentación denominada Cuenca Sandino, esta cuenca cubre el área de la plataforma del Pacífico y se extiende costa dentro hasta el graben nicaragüense, el relleno sedimentario de la cuenca consiste en una capa de sedimentos de 10 kilómetros de espesor depositados durante el Cretácico-Paleógeno y sedimentos someros depositados durante el Neógeno (Darce y Duarte, 2001).

Estos depósitos son notorios en el istmo de Rivas donde procesos compresivos han formado un sistema de anticlinales y un intenso fallamiento en el área, ocasionando levantamiento de corteza. Al noreste de la ciudad de San Juan del Sur se observa un bloque el cual forma parte del sistema de anticlinales del área, este tiene una dirección NO-SE y coincide con la dirección de la zona de subducción de las placas de Cocos y la placa Caribe, en el sitio se han formado fallas paralelas y transversales a la estructura principal.

Estas estructuras geológicas han ocasionado debilitamiento en las rocas sedimentarias del sitio, las cuales forman parte de la formación Brito conformada por areniscas, margas, lutitas, calizas y conglomerados. Estas rocas altamente fracturadas, con un alto grado de meteorización y alteración tienen a caer con facilidad.

De esta condición de las rocas surge una problemática que afecta principalmente a la ciudad de San Juan del Sur, esta es una zona con pendientes abruptas y un rápido crecimiento poblacional debido al turismo, la necesidad de construir viviendas, hoteles, restaurantes, residencias, etc. Hacen que los pobladores se ubiquen sobre laderas donde las condiciones de las rocas no son óptimas para la construcción.

Dentro de la ciudad se analizó el tipo de roca en el cual se identificaron areniscas volcano-clásticas, areniscas fosilíferas, lutitas y calizas, estas rocas presentan un alto grado de meteorización y alteración, las modificaciones antrópicas en las laderas ocasionan que estas afloren en pendientes de hasta 90°.

Estudiando estructuralmente el sitio las rocas son afectadas por fallas normales, inversas y laterales seguidas de un alto grado de fracturamiento, ocasionando un rápido intemperismo en estas. Estas características sumado al mal uso del suelo funcionan como factores condicionantes, posteriormente factores desencadenantes como huracanes y sismos, ocasionan movimientos de masa.

El objetivo de este estudio fue la caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables ante movimientos de masa en el área de San Juan del Sur mediante la aplicación de estudios geológicos, geomorfológicos, análisis geotécnicos y técnicas de observación directa en campo. Con estos datos y el análisis de fotografías aéreas, imágenes satelitales, el mapa altimétrico, de pendiente y topográfico del área, se elaboró un mapa de inventario de movimientos de terreno y zonas inestables, además que utilizando la metodología del COSUDE-INETER, 2005. Se elaboró un mapa de amenaza para el municipio, una vez concluida la etapa de análisis se realizaron recomendaciones de medidas de mitigación contra la inestabilidad de terrenos en este sitio.

Estas recomendaciones van a ser útiles para la toma de decisiones de la municipalidad, autoridades locales y la Defensa Civil dentro de la planificación local, de esta manera proponer y elaborar estrategias para reducir el impacto de movimientos de terrenos en las áreas con amenaza latente y así contribuir a ordenamiento territorial de la zona, cumpliendo con las normativas de desarrollo urbano de la ciudad.

Contenido

1Capítulo	1
1.1Introducción	1
1.2Localización y acceso	3
1.3Planteamiento del problema.....	5
1.4Justificación.....	7
1.5Objetivos	8
1.5.1General	8
1.5.2Específicos.....	8
2Capítulo	9
2.1Antecedentes	9
2.2Marco teórico	11
2.2.1Marco conceptual.....	11
2.3Hipótesis	29
3Capítulo	30
3.1Diseño metodológico	30
3.1.1Enfoque de la investigación.....	30
3.1.2Tipo de estudio.....	30
3.1.3Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de información y Datos.	30
3.1.4Trabajo de Campo.	32
3.1.5Trabajos de laboratorios	35
3.1.6Procesamiento de datos	37
3.1.7Elaboración de mapas.....	41
3.1.8Realización del documento final.....	41
3.2Marco Geotectónico de América Central	42
3.3Geología Regional de Nicaragua.....	44
4Capítulo	48
4.1Geología local	48

4.1.1Litología de San Juan del Sur	48
4.1.2Geología Estructural.....	63
4.1.3Procesos de movimientos de masa en San Juan del Sur.....	87
4.1.4Análisis geotécnico para los barrios Las Pampas y Pedro Joaquín Chamorro ...	102
4.1.5Zonificación de la amenaza por movimientos en masa en San Juan del Sur	114
5Capítulo	116
5.1Conclusiones	116
5.2Recomendaciones	118
5.3Bibliografía	120
5.4Anexos	125

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Coordenadas UTM del área de estudio.....	3
Tabla 2.1. Significado de los mapas de amenaza.....	27
Tabla 3.1. Coordenadas de los puntos visitados.....	32
Tabla 3.2 Pruebas de laboratorio a suelos y rocas.....	36
Tabla 3.3. Propiedades usadas en el modelamiento de Las Pampas.....	38
Tabla 3.4. Propiedades usadas en el modelamiento del Pedro Joaquín Chamorro.....	40
Tabla 4.1. Propiedades físico y mecánicos de los suelos y rocas en las Pampas.....	102
Tabla 4.2. Propiedades físico y mecánicos de los suelos y rocas en El Pedro Joaquín Chamorro.....	103
Tabla 5.1. Tabla de Indicadores Cinemáticos.....	125

Lista de Figuras

Figura 1.1. Mapa de ubicación del área de estudio.....	4
Figura 2.1. Esfuerzos y deformación de la corteza.....	12

Figura 2.2. Tipos de Fallas de acuerdo a los esfuerzos.....	13
Figura 2.3. Arreglos geométricos de las fracturas.....	14
Figura 2.4. Arreglos para fallas y fracturas.....	16
Figura 2.5. Tipos de Cizalla.....	16
Figura 2.6. Modelo de cizalla simple.....	17
Figura 2.7. Modelo de cizalla pura.....	17
Figura 2.8. Modelo de caída de bloques.....	20
Figura 2.9. Modelo de volcamiento.....	21
Figura 2.10. Reptación superficial en ladera.....	21
Figura 2.11. Esquema de una colada de flujo.....	22
Figura 2.12. Esquema de deslizamiento pelicular.....	22
Figura 3.1. Captura de pantalla del programa STERONET.....	37
Figura 3.2. Perfil de suelos y rocas en Barrio Las Pampas.....	39
Figura 3.3. Perfil de suelos y rocas en Barrio Pedro Joaquín Chamorro.....	40
Figura 3.4. Marco Geo-tectónico de Centro América.....	43
Figura 3.5: Provincias Geológicas de Nicaragua.....	44
Figura 4.1. Mapa Geológico de San Juan del Sur.....	62
Figura 4.2. Mapa de ubicación de puntos visitados.....	64
Figura 4.3. Mapa Topográfico de San Juan del Sur.....	67
Figura 4.4. Mapa altimétrico de San Juan del Sur.....	68
Figura 4.5. Mapa de Pendiente, San Juan del Sur.....	69
Figura 4.6. Mapa de modelo de Sombras, San Juan del Sur.....	70
Figura 4.7. Roseta de fracturas de la zona Norte de San Juan del Sur.....	71

Figura 4.8. Roseta de fracturas de la zona Central de San Juan del Sur.....	72
Figura 4.9. Roseta de fracturas de la zona Sur de San Juan del Sur.....	73
Figura 4.10. Diagrama de Rosas general de la Ciudad de San Juan del Sur.....	85
Figura 4.11. Mapa Estructural de San Juan del Sur.....	86
Figura 4.12. Mapa de Inventario sobre movimientos de masa.....	89
Figura 4.13. Columna de suelos y rocas en el sector de Las Pampas.....	104
Figura 4.14. Columna de suelos y rocas en el sector de El Pedro Joaquín Chamorro.....	105
Figura 4.15. Análisis de estabilidad por método de Morgenstern-Price Las Pampas.....	110
Figura 4.16. Análisis de estabilidad por método de Spencer Las Pampas.....	110
Figura 4.17. Análisis de estabilidad por método de Jambu Modificado Las Pampas.....	110
Figura 4.18. Método Jambu corregido, Pedro Joaquín Chamorro.....	112
Figura 4.19. Método Morgenster-Price, Pedro Joaquín Chamorro.....	112
Figura 4.20. Método Spencer, Pedro Joaquín Chamorro.....	112
Figura 4.21. Mapa de Zonificación de amenaza ante movimientos de masa.....	115

Lista de Fotografías

Foto 2.1. Arreglos para fracturas encontradas en campo.....	15
Foto 2.2. Estructura sigmoidal observada en campo.....	18
Foto 2.3. Rocas plegadas de San Juan del Sur.....	19
Foto 2.4. Fracturas secundarias tipo R y R' mapeadas en campo.....	19
Foto 3.1. descripción de muestras de rocas.....	35
Foto 3.2. Pruebas en laboratorio en los Laboratorios del IGG-CIGEO/UNAN-Managua..	36
Foto 4.1. Afloramientos de Calizas fosilíferas.....	49

Foto 4.2. Muestras de mano de calizas.....	50
Foto 4.3. Caliza de grano fino.....	51
Foto 4.4. Unidad de Lutita, Carbonato de calcio en estratos y rellenando fracturas.....	52
Foto 4.5. Muestra de mano de Lutita.....	53
Foto 4.6. Unidad Lutita en sección delgada.....	54
Foto 4.7. Unidad Arenisca Fosilífera.....	55
Foto 4.8. Muestra de Mano de unidad Arenisca Fosilífera.....	56
Foto 4.9. Arenisca Fosilífera en sección delgada.....	57
Foto 4.10. Unidad Arenisca.....	58
Foto 4.11. Unidad Arenisca Volcano-Clástica.....	59
Foto 4.12. Unidad Arenisca fosilífera	61
Foto 4.13. Afloramiento de Lutitas y areniscas sistema de fallas El Mirador.....	74
Foto 4.14. Afloramiento de Calizas, Sistema de fallas El Mirador.....	75
Foto 4.15. Afloramiento de Lutitas en Sistema de Fallas El Mirador.....	75
Foto 4.16. Afloramiento de Areniscas y Lutitas, mirador Cristo de la Misericordia.....	76
Foto 4.17. Área del cristo de la misericordia, San Juan del Sur.....	76
Foto 4.18. Unidad de Lutitas, Falla el Faro.....	77
Foto 4.19. Unidad de Lutitas deformada por fracturas curvilíneas.....	78
Foto 4.20. Unidad de Areniscas Fosilíferas, Lutitas Y Calizas.....	78
Foto 4.21. Afloramientos de Lutitas.....	80
Foto 4.22. Carbonato de calcio rellenando fracturas, unida de Lutitas.....	81
Foto 4.23. Unidad de Lutitas, Falla San Juan	81

Foto 4.24. Unidad de Calizas, Falla El Remanso.....	82
Foto 4.25. Estructura Stepovers afectando la Unidad Lutitas, Falla El Remanso.....	83
Foto 4.26. Vivienda ubicada sobre rocas de tipo Lutitas totalmente meteorizadas y fracturadas.....	91
Foto 4.27. Desprendimiento de Rocas y bloques, Unidad de Calizas.....	92
Foto 4.28. Inestabilidad en el barrio Camilo ortega, unidad Lutita.....	93
Foto 4.29. Inestabilidad del terreno en el Barrio Zacarías Mora.....	94
Foto 4.30. Unidad Lutita afectada por fracturas.....	95
Foto 4.31. Caída de detritos en el Barrio Zacarías Mora.....	96
Foto 4.32. Fracturas con desplazamiento en el Barrio Zacarías Mora.....	96
Foto 4.33. Caída de detritos, rocas y bloques en el mirador del Cristo de la Misericordia..	97
Foto 4.34. Caída de detritos, mirador del Cristo de la Misericordia.....	98
Foto 4.35. Alto grado de fracturamiento ocasionando movimientos de masa.....	99
Foto 4.36. Inestabilidad del terreno en el barrio Las Pampas.....	100
Foto 4.37. Ladera afectando viviendas en el barrio Las Pampas.....	100
Foto 4.38. Inestabilidad del barrio Pedro Joaquín Chamorro.....	101
Foto 4.39. Casas en el pie de la ladera en el barrio Las Pampas.....	106
Foto 4.40. Muro de contención en el barrio Las Pampas.....	107
Foto 4.41. Barrio Pedro Joaquín Chamorro.....	108

Anexos

Tabla 5.1. Tabla de Indicadores Cinemáticos.....	125
--	-----

1 Capítulo

1.1 Introducción

En el presente trabajo monográfico se muestra la estructura y la metodología que se utilizó para realizar la investigación denominada: **“Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas”**. Los desastres asociados a la inestabilidad de laderas generan impactos negativos en el ámbito socio-económico y ambiental, además de pérdidas de vida y daños a la cubierta vegetal, también ocasionan afectaciones a las viviendas e infraestructura. Son fenómenos naturales que constituyen uno de los procesos geológicos más frecuentes, causados por la acción de la gravedad y el debilitamiento de los materiales, estos movimientos frecuentemente están asociados a otros tipos de eventos ya sean por acción natural, socio-natural, geológico, hidrometeorológicos o antrópico.

Nicaragua es catalogado como uno de los países con mayor riesgo debido a su conformación geológica, estructura morfológica, ubicación geográfica, régimen de lluvias, etc., el territorio nicaragüense presenta antecedentes de fenómenos naturales tales como sismos, huracanes, inundaciones, deslizamientos, erupciones volcánicas, tsunamis, sequías e incendios forestales, estos eventos pueden afectar de forma aislada o combinada a la población (SINAPRED 2005).

En el año 2017 la tormenta NATE ocasionó inundaciones y movimientos de masa en el país, afectando principalmente los departamentos de Matagalpa, Chontales, Carazo, León, Chinandega y Rivas, siendo este último uno de los más afectados.

San Juan del Sur al igual que todo el departamento de Rivas es vulnerable a varios tipos de amenazas entre ellas están los sismos, inundaciones, tsunamis y huracanes; estas amenazas a su vez son factores que contribuyen de una u otra manera en los movimientos de masa, otro factor muy importante son las transformaciones antropogénicas negativas un ejemplo de esto son las construcciones de mansiones y residencias en zonas altas del municipio, esto

ocasiona sobrecargas a la ladera la cual está compuesta de rocas sedimentarias con un alto grado de meteorización y fracturamiento.

Este municipio está asentado sobre un ambiente sedimentario donde esfuerzos tectónicos relacionados con la subducción de la placa Cocos y la placa Caribe afectaron estos depósitos de rocas, ocasionando un fracturamiento y fallamiento local, estas estructuras geológicas funcionan como factores condicionantes en los movimientos de masa, por esto mismo los procesos geológicos y la inestabilidad de ladera van de la mano y estudiar el área geológicamente es entender de gran manera los eventos de remoción en masa que han ocurrido y ocurrirán en el futuro.

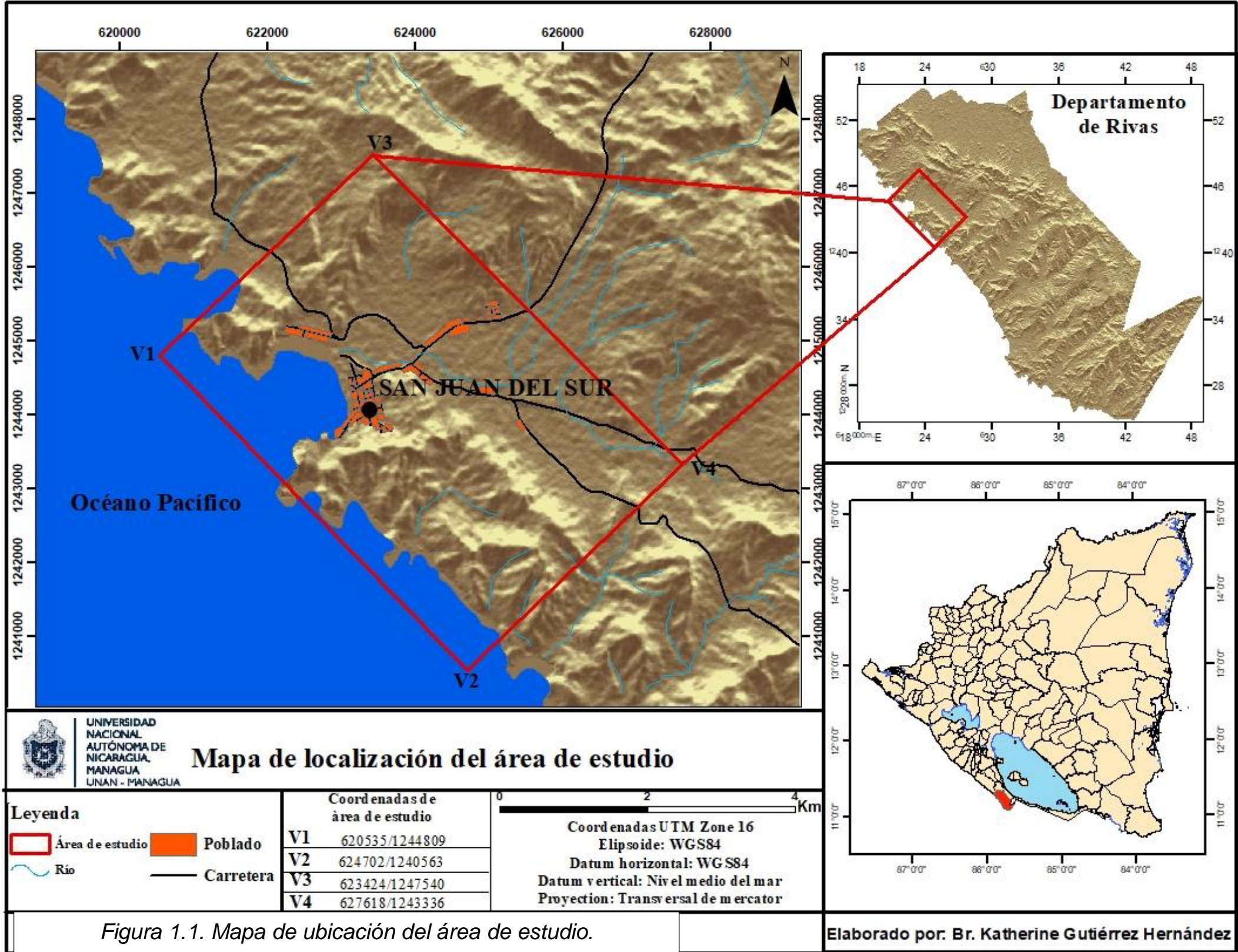
1.2 Localización y acceso

El área de estudio está localizada en el departamento de Rivas, municipio de San Juan del Sur, abarca un área de 24 km², comprende la hoja topográfica San Juan el Sur (3049 IV) y está ubicado a 130 Km al Sur de Managua en la costa Pacífica de Nicaragua (Figura 1.1). Limita al Norte con Rivas, al Sur y Oeste con el Océano Pacífico y al Este con Cárdenas.

La vía de acceso al área de estudio desde la capital de Nicaragua, Managua es por la carretera panamericana pasando por Rivas hasta llegar al municipio La Virgen, después tomar una vía secundaria recorriendo 18 km hacia el Suroeste. En la tabla 1.1 se muestran las coordenadas del área de estudio.

Tabla 1.1. Coordenadas UTM del área de estudio

Coordenadas del área de Estudio		
Vértice	<i>Este</i>	<i>Norte</i>
1	620535	1244809
2	624702	1240563
3	623424	1247540
4	627618	1243336



1.3 Planteamiento del problema

San Juan del Sur es uno de los principales destinos turísticos en Nicaragua, a diario cientos de turistas de todo el país y el mundo visitan esta localidad. Según el Instituto Nicaragüense de Turismo, en el año 2017, ingresaron al país 1,787, 290 visitantes internacionales, lo que significó US\$ 700 millones de dólares en ingresos. El crecimiento rápido de esta ciudad ha ocasionado que los habitantes construyan sus viviendas e infraestructura turística en lugares con pendientes pronunciadas siendo esto un punto a considerar en cuanto a seguridad ante amenazas naturales.

La ciudad de San Juan del Sur se caracteriza por ser una zona muy vulnerable a fenómenos naturales, principalmente es afectada por sismos que van desde microsismos a terremotos, inundaciones como las ocurridas en 1992 y 2017, las cuales causaron pérdidas tanto humanas como económicas. También se caracteriza por presentar una topografía o relieve accidentado, por lo que podemos observar desde cerros a pequeñas depresiones, estos cerros pueden alcanzar alturas de hasta 450 msnm y son susceptibles a movimientos de terrenos.

El área está compuesta por una sucesión de sedimentos volcano-clásticos y carbonatos detríticos con una edad establecida entre el Paleoceno superior hasta el Oligoceno inferior donde se encuentran rocas como lutitas color ocre, calizas, margas, brechas y conglomerados (MEM, 2002). Estas rocas de origen sedimentario se caracterizan por presentar un alto grado de fracturamiento y al estar expuestas al intemperismo la roca se encuentra altamente meteorizada ocasionando que esta fácilmente caiga por efecto de la gravedad.

Estudios realizados por el Sistema Nacional de Prevención y Mitigación ante Desastres; SINAPRED (2017), enfatizan en la amenaza a la que está expuesta la ciudad de San Juan del Sur ante movimientos de remoción, para lo cual hicieron un reconocimiento de campo aplicando términos geológicos tales como: nivel de fracturamiento y fallamiento, además de descripción de tipo de rocas en áreas marcadas por la alcaldía municipal como puntos críticos.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

Cabe mencionar que dicha información es poca detallada y se apega a la vulnerabilidad de las personas ante este tipo de sucesos, por lo que sería de gran importancia realizar un estudio enfocado en estructuras geológicas que incidan en la inestabilidad del sitio y así poder describir los indicadores que nos permitan comprender el porqué de estos movimientos de terreno.

1.4 Justificación

El presente trabajo monográfico se llevó a cabo con la finalidad de contribuir al fortalecimiento de las capacidades municipales para reducir riesgos a desastres enfocados principalmente en la inestabilidad de laderas, así poder proporcionar al municipio elementos útiles para una planificación estratégica que contribuya al ordenamiento territorial, uso del suelo y estudios a mayor profundidad en esta temática.

San Juan del Sur ha sido densamente poblada en los últimos años y a su vez conformada por barrios que rápidamente han alcanzado altos niveles poblacionales en todo el municipio y sus alrededores, de esta manera se ha alcanzado un gran desarrollo en la parte de la infraestructura, entre ellas se puede encontrar hoteles, residencias, casas, cabañas sistemas de acueductos y alcantarillado, redes de agua potable etc.

Sin embargo, muchas de estas edificaciones se ubican en lugares donde el tipo de suelo no presta las condiciones para habitar, las grandes edificaciones se están construyendo en las partes altas del municipio ocasionando sobrecargas en el terreno, estas construcciones se realizan sin tomar en cuenta que en la parte baja de la ladera se sitúan viviendas vulnerables a eventos de remoción en masa, ya que en cualquier momento el material fracturado y debilitado por los agentes atmosféricos puede caer por efecto de la gravedad.

A pesar del riesgo existente en la zona, no se han realizado muchos estudios respecto a este tema, por lo que es importante generar información acerca de la ocurrencia de movimientos de terreno en San Juan del Sur, enfocado principalmente con las características o indicadores geológico-estructurales de la zona. Se pretende caracterizar indicadores estructurales y comprobar si estos inciden en el comportamiento del suelo.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

- Caracterizar los indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur.

1.5.2 Específicos

- Realizar mapa Geo-estructural del área de interés a escala 1:60,000.
- Identificar la relación entre las estructuras geológicas existentes en el sitio y áreas inestables ante movimientos de terreno.
- Describir la lito-estratigrafía del área de estudio y el grado de alteración de la roca.
- Elaborar un mapa de zonificación ante amenaza por movimientos de terreno.

2 Capítulo

2.1 Antecedentes

Recopilando información acerca del área de interés se obtuvieron muy pocos datos sin embargo se hizo una breve descripción de estudios relacionados con la geología regional de la zona.

- **McBirney, A., y Williams, H. (1965). Volcanic history of Nicaragua.** Dividen Nicaragua en cuatro provincias geológicas: Provincia del Norte, Provincia Central, Provincia de la Costa del Pacífico y Provincia de los llanos de la Costa Atlántica.
- **Hodgson (2000). Léxico Estratigráfico de Nicaragua.** Realiza una recopilación de información y describe las Provincias de Nicaragua incluyendo la Provincia de la Costa del Pacífico.
- **Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, (INETER, 2001). Amenazas Naturales de Nicaragua.** Realiza un resumen de los diferentes tipos de amenaza existentes en Nicaragua, tomando como base datos de sismos, amenazas volcánicas, fenómenos hidrometeorológicos y amenazas de inestabilidad de ladera. Utilizando esto como base para obtener referencias de los diferentes tipos de fenómenos geológicos que se han detectado en la región.
- **Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2002). Geología de la cuenca Sandino en costa adentro.** Realizaron un breve documento con aspectos geológicos y sedimentarios de las facies pelágicas-turbidíticas de la parte sureste en costa dentro de la cuenca Sandino del Océano Pacífico de Nicaragua concluyendo en la existencia de hidrocarburos provenientes del Eoceno medio.
- **Sistema Nacional para la Prevención Mitigación y Atención a Desastre (SINAPRED, 2005). Reporte sobre las amenazas, vulnerabilidades y riesgos ante inundaciones, deslizamientos, actividad volcánica y sismos.** Realizó un levantamiento de campo donde describen las diferentes

amenazas a las que son propensos los habitantes de San Juan del Sur, donde concluyen que el municipio de San Juan del Sur se encuentra expuesto en forma permanente a amenazas naturales principalmente por inestabilidad de ladera, inundaciones y actividad sísmica.

- **Sistema Nacional para la Prevención Mitigación y Atención a Desastre (SINAPRED, 2017). Levantamiento y digitalización de puntos críticos en el departamento de Rivas.** Realizaron un estudio acerca de la amenaza por deslizamientos e inundaciones en el territorio de Rivas abarcando San Juan del Sur, donde se enfocan en la vulnerabilidad de las viviendas y la preparación de las personas ante estos eventos, luego presentan esta información en un mapa multi-amenaza.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Marco conceptual

Es necesario comprender como funciona nuestro planeta para nuestra supervivencia y bienestar, para esto es importante la aplicación del conocimiento geológico en nuestro medio. La geología es la ciencia que se encarga del estudio de la tierra, siendo esto algo complejo debido a que nuestro planeta es un cuerpo dinámico que cambia día con día, estos cambios pueden ser de manera lenta que no se pueden apreciar durante nuestras vidas o tan rápidos y violentos como por ejemplo cuando ocurren movimientos de terreno (Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005).

Para realizar el trabajo monográfico se realizó una correlación entre fallas y fracturas identificadas en campo y los movimientos de masa que acontecen en el municipio de San Juan del Sur, para conocer que tanto inciden estas estructuras con estos eventos, a continuación, se detallarán conceptos y parámetros que se utilizarán para cumplir con este objetivo.

2.2.1.1 Geología Estructural

La geología estructural es el estudio de las rocas deformadas (Spring, 1999). Las rocas revelan una historia de deformación que muestra que han aflorado de niveles mucho más profundos de la corteza. Los geólogos estructurales son los que se encargan del estudio de la arquitectura de la corteza terrestre, así como de la compresión del cómo y porque adquirió el aspecto que conocemos hoy en día estudiando la orientación de los pliegues y las fallas, así como los rasgos a pequeña escala de las rocas deformadas (Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005).

Esfuerzo y Deformación

Esfuerzo (stress): Es la cantidad de fuerza que actúa sobre una unidad de roca y que como resultado de su acción la roca cambia de forma (Figura 2.1) y/o volumen (UNAM, 2015).

Los esfuerzos pueden ser originados por diversas causas (presión confinante, compresión, tensión y cizalla presión confinante, compresión, tensión y cizalla).

-Presión Confinante: Con la profundidad aumenta la presión confinante y las rocas, que en la superficie son rígidas, en la profundidad pueden comportarse plásticamente. Así aumenta el esfuerzo de ruptura y se facilita la deformación dúctil.

-Esfuerzos compresivos: Son fuerzas colineales actuando en sentidos opuestos y convergentes; acortan y adelgazan un cuerpo.

-Esfuerzos tensionales: Son fuerzas colineales actuando en sentidos opuestos y divergentes; jalan o alargan y adelgazan un cuerpo.

-Esfuerzos de cizalla: Son fuerzas paralelas no colineales actuando en sentidos opuestos; desgarran un cuerpo.

Deformación: Las rocas son sometidas a esfuerzos que superan su propia resistencia, se deforman normalmente plegándose, fluyendo o fracturándose, cada tipo de roca se deforma de una manera diferente, las rocas responden primero deformándose elásticamente. es decir la roca volverá prácticamente a su tamaño y forma originales cuando cese el esfuerzo. Cuando se sobrepasa el límite elástico de la roca esta fluye lo que se denomina como deformación dúctil o se fractura denominado como deformación frágil. Estos tipos de deformaciones van en dependencia de factores como el tipo de roca, la presión, temperatura, la disponibilidad de fluidos y el tiempo (Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005).

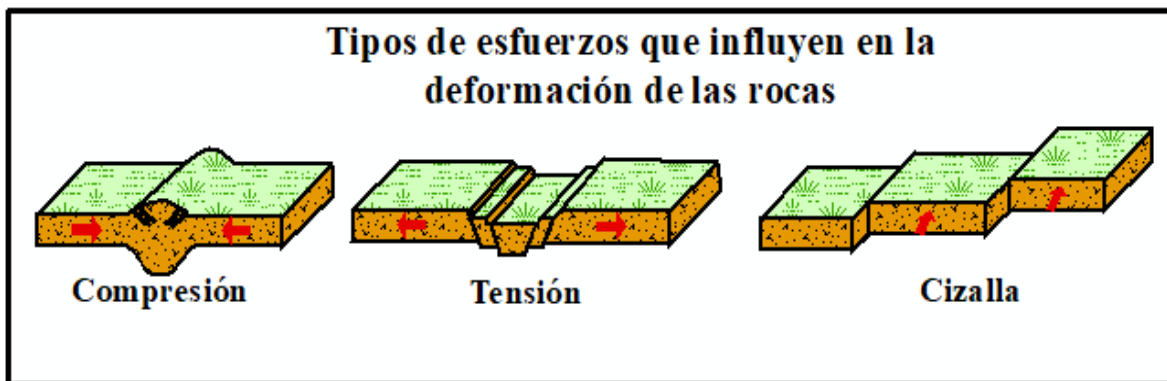


Figura 2.1. Esfuerzos y deformación de la corteza

Modificado de Garcia, 2012.

Fallas y Fracturas

Fallas: Representan diferentes tipos de respuesta por parte de las rocas a las tensiones impuestas. en ellas, son superficies de fractura a lo largo de las cuales es apreciable o se ha producido un desplazamiento en las capas. Las fallas son consideradas como discontinuidades estructurales (Richard J. Lisle, 2004).

Hay tres tipos de fallas fundamentales (Figura 2.2), clasificadas desde el punto de vista del esfuerzo que la generan: normal, inversa y de rumbo.

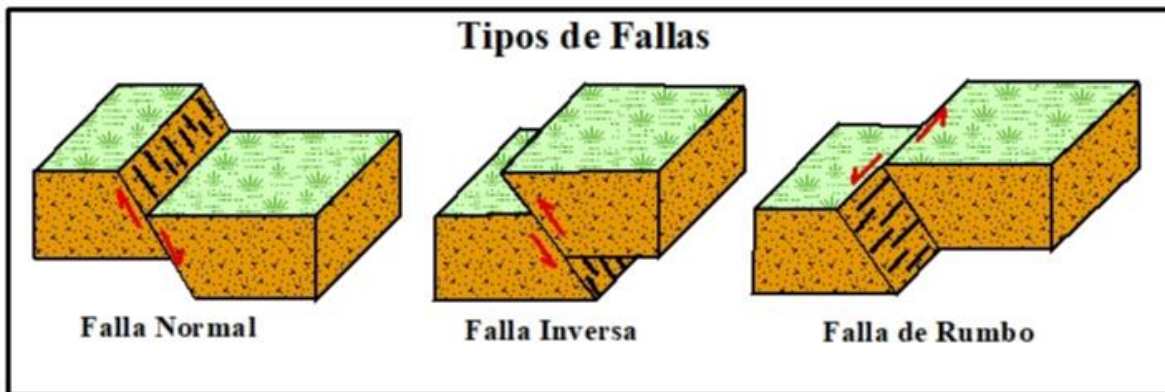


Figura 2.2. Tipos de Fallas de acuerdo a los esfuerzos

Modificado de García, 2012.

-Fallas normales Las fallas con desplazamiento vertical se les denomina como fallas normales, el bloque de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de muro.

-Fallas inversas y cabalgamientos: Son fallas con desplazamiento vertical en las cuales el bloque de techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque de muro se denominan de cabalgamiento cuando el buzamiento es inferior a 45° (Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005). Y tienen un desplazamiento de 1 a 10 km.

-Fallas de Rumbo: Es de cizalladura o transcurrente, el desplazamiento puede ser derecho o izquierdo dependiendo de lo que suceda con el bloque del frente, cuando un observador mira desde el otro bloque. Si aquel se desplaza a la derecha, la falla será de rumbo dextrógiro y si lo hace hacia la izquierda, la falla será de rumbo levógiro o sinextrógiro.

Fracturas

Bajo el campo de la deformación frágil las rocas se rompen conforme a superficies más o menos planas, a estas superficies de ruptura se les denominan fracturas, cuando no se aprecia un desplazamiento entre los dos ámbitos definidos por la superficie de discontinuidad en sentido paralelo a la propia superficie.

Las fracturas se clasifican en diferentes arreglos geométricos (Figura 2.3).

- ♦ Paralelo
- ♦ Relay
- ♦ En échelon
- ♦ Relevo
- ♦ Abanico
- ♦ Curvilineares
- ♦ Anastomazado

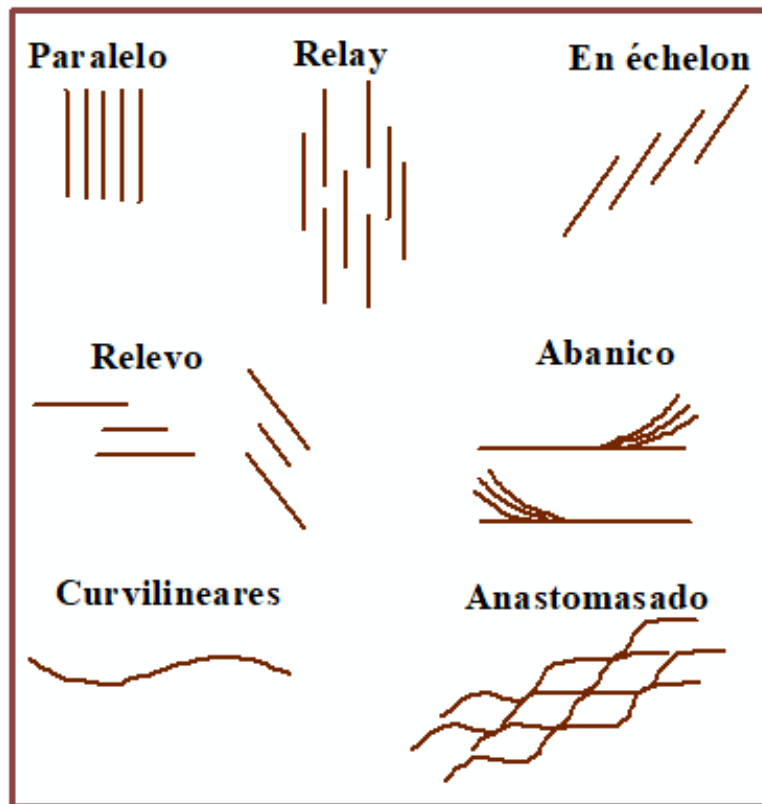


Figura 2.3. Arreglos geométricos de las fracturas

Fuente: Gutiérrez y Mon, 2008.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

En la Foto 2.1 se observan los arreglos para las fracturas que se definieron en la etapa de campo.

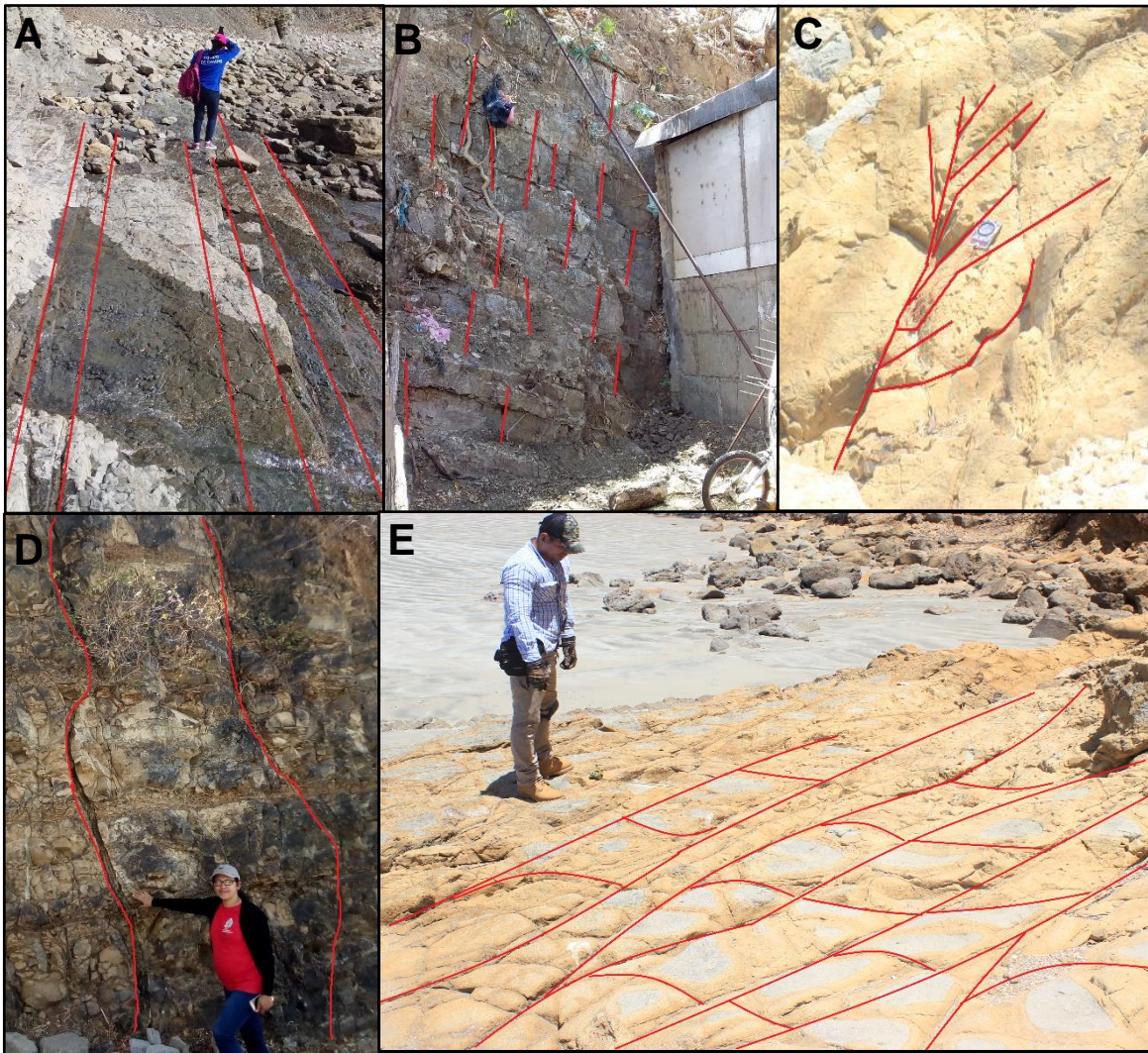


Foto 2.1. Arreglos para fracturas encontradas en campo

Se observa en la foto A; Fracturas paralelas, foto B; Fracturas Relay, foto C; terminación en abanico, foto D; fracturas curvilíneas y foto D; sistemas anastomazados.

Se pueden observar tres tipos de arreglos para las fallas y fracturas: conjugado, perpendicular y complejo (Figura 2.4).

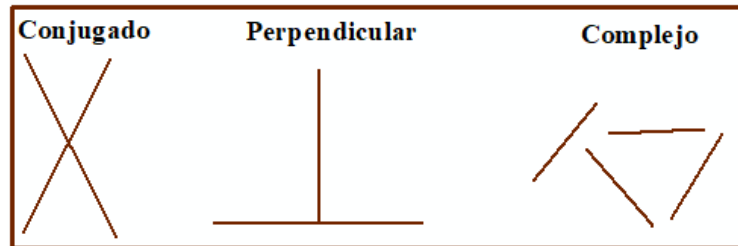


Figura 2.4. Arreglos para fallas y fracturas

Fuente: Gutiérrez y Mon, 2008

Criterios de Cizalla

Una zona de cizalla corresponde a una ancha zona de deformación generada bajo condiciones dúctiles a dúctiles-frágiles, la cual al extenderse hacia la superficie se convierte en una zona de fallamiento o dislocación ya sean locales o regionales.

En la Figura 2.5 se puede observar que en dependencia del mecanismo de deformación y de la rotación progresiva de la elipse con incremento del esfuerzo se han definido dos modelos de deformación: cizalla pura y cizalla simple (Tolson, 1996).

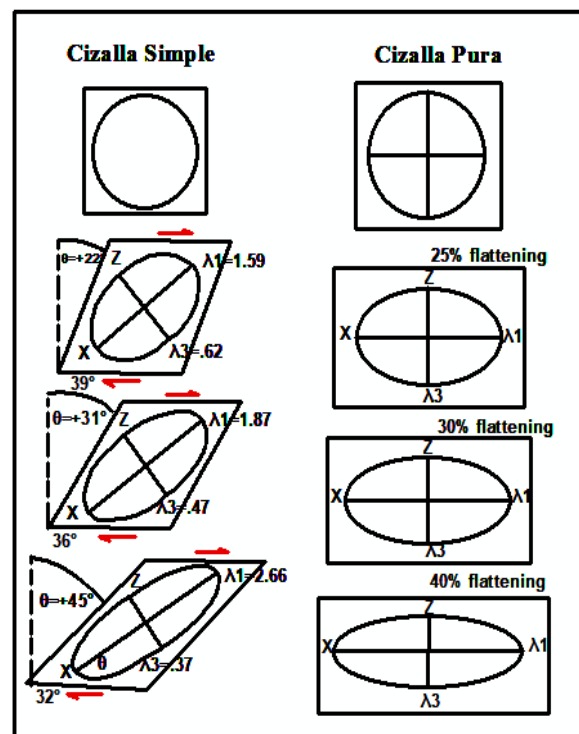


Figura 2.5. Tipos de Cizalla (Tolson, 1996).

-Cizalla Simple: Las estructuras se deforman de manera no coaxial, rotacional y asimétrica (Figura 2.6) como es el caso de fallas lístricas, en donde el cambio de ángulo de la falla principal origina rotación en los bloques.

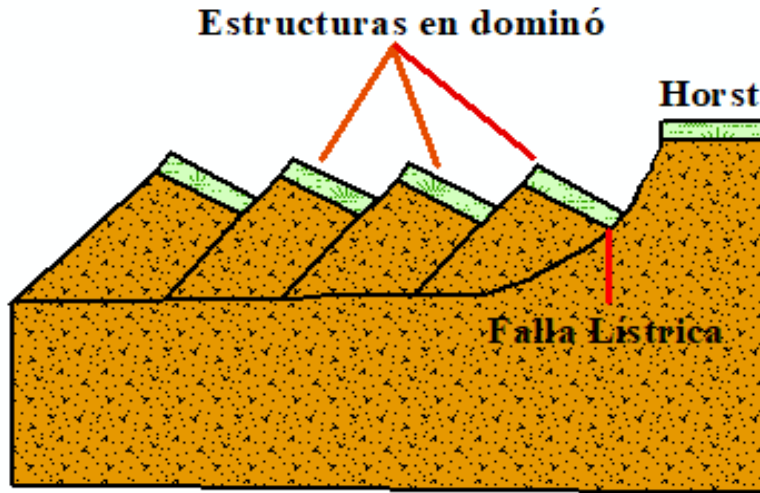


Figura 2.6. Modelo de cizalla simple.

Modificado de Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005.

-Cizalla Pura: Las estructuras se deforman de manera coaxial, no rotacional y simétrica, (Figura 2.7) ejemplo de este tipo de cizalla es la formación de depresiones tectónicas o pilares tectónicos (horst).

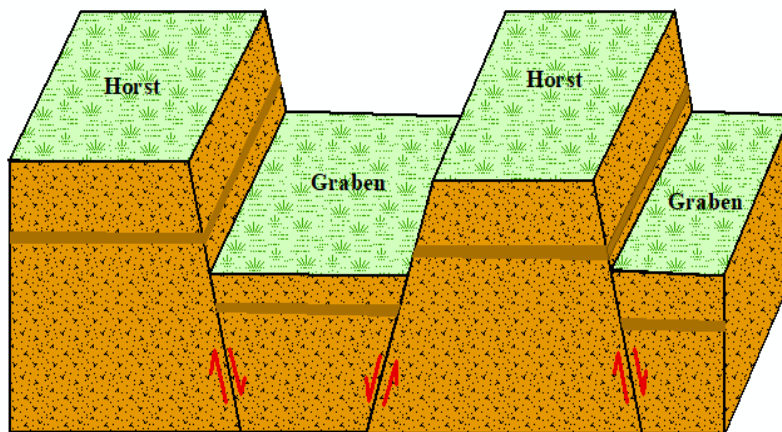


Figura 2.7. Modelo de cizalla pura.

Modificado de Tarbuck, E., & Lutgens, F., 2005.

Indicadores Cinemáticos

Es una herramienta que permite identificar el sentido del desplazamiento o movimiento relativo de los bloques en una zona de falla, donde es difícil la observación y determinación de la separación de marcadores estratigráficos. Se basa en las estructuras secundarias formadas durante el fallamiento (García Palomo, 1998).

A continuación, se definen los indicadores cinemáticos encontrados en campo (Tolson, 1996).

Sigmoides: Son estructuras que se forman a lo largo de zonas de cizalla dextrales o sinestrales (Foto 2.2). De forma general, como producto de una compresión o extensión a una escala más restringida respecto a la escala en la que se produce la cinemática correspondiente a la zona de cizalla principal. Por ello es que durante su formación desarrollan formas romboédricas muy definidas que bien pueden estar abiertas o rellenas por mineral.

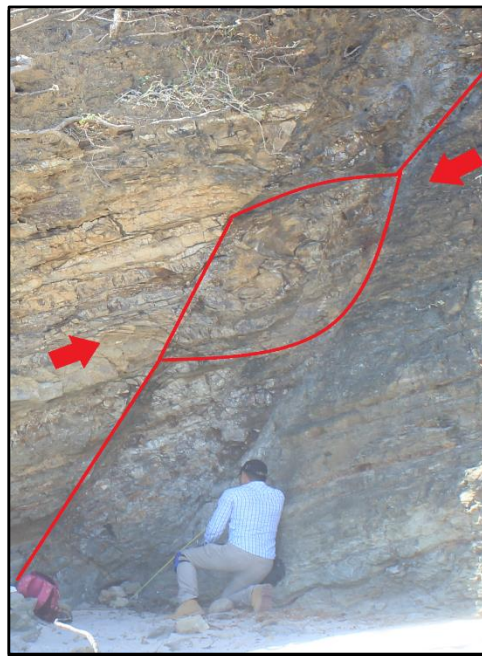


Foto 2.2. Estructura sigmoidal observada en campo.

-Pliegues: Los pliegues (Foto 2.3) formados por capas inicialmente paralelas al plano de cizalla indican el sentido correcto de cizalla. Sin embargo, los pliegues formados en capas transversales a la zona de cizalla pueden mostrar el sentido correcto o incorrecto del desplazamiento.



Foto 2.3. Rocas plegadas de San Juan del Sur

-Fracturas secundarias: Las fallas desarrollan una serie de fracturas secundarias cuya orientación y cinemática acusan el sentido de desplazamiento sobre la falla. Estas pueden ser de cizalla (R, R' y P), o extensionales (T), (Foto 2.4). Si R y P se confunden, la interpretación del sentido de cizalla es incorrecta.

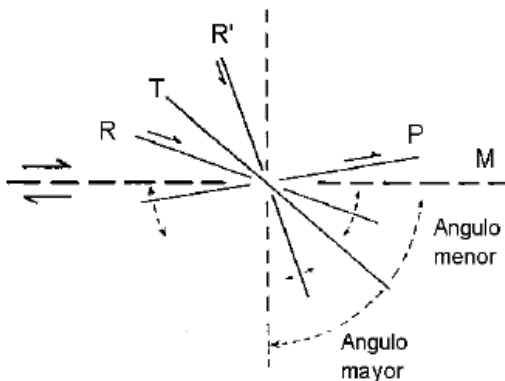


Foto 2.4. Fracturas secundarias tipo R y R' mapeadas en campo.



2.2.1.2 Movimientos de masa

Los movimientos en masa son desplazamientos de terreno a favor de la pendiente que se generan por acción de la fuerza de gravedad, bajo la influencia de ciertos factores como son el agua, los eventos sísmicos, la aplicación de carga excesiva, las excavaciones para la adecuación de viviendas o la apertura de senderos y vías, entre otros. Se pueden clasificar como deslizamientos, flujos, desprendimientos, caída de rocas, hundimientos, fenómenos de reptación, entre otros, dependiendo del mecanismo de falla, la velocidad del fenómeno y el tipo de material involucrado (Tecnológico de Antioquia I.U, 2017)

-Derrumbes y caída de bloques: Presentan una ruptura brusca y caída más o menos libre y a gran velocidad, los volúmenes implicados suelen ser hasta de 100,000 m³, rara vez presentan signos precursores o anunciadores, muy a menudo son desencadenados por factores exógenos, (Figura 2.8).

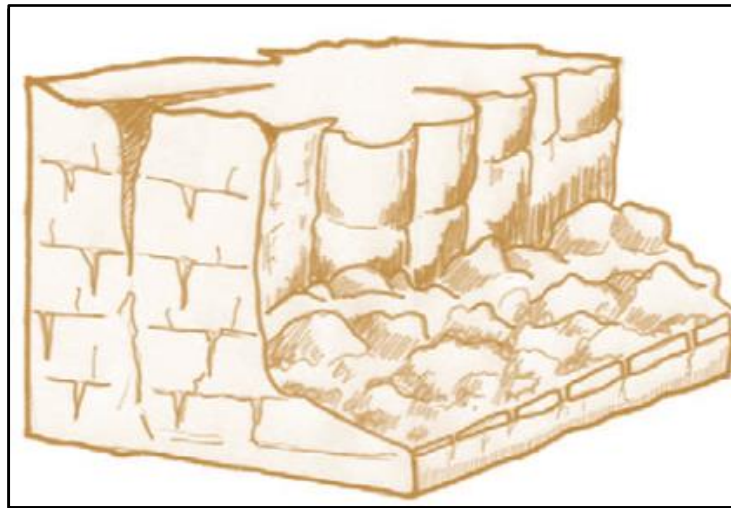


Figura 2.8. Modelo de caída de bloques (INETER, 2005).

-Volcamiento o basculamiento: Es causado por acción de la gravedad terrestre o de procesos tectónicos distensivos (Figura 2.9), Existen dos variantes: el doblamiento plástico y el doblamiento rígido, que podría ser llamado, más apropiadamente, basculamiento (INETER, 2005)

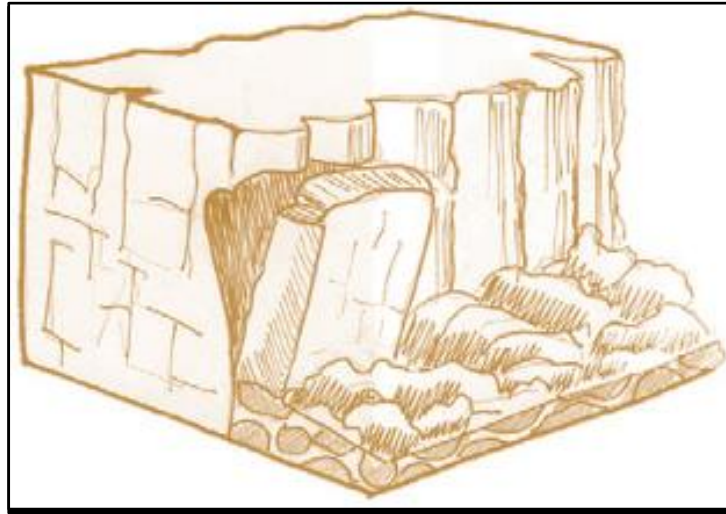


Figura 2.9. Modelo de volcamiento (INETER, 2005).

-Reptación: Consiste en un desplazamiento y redistribución del suelo (Figura 2.10) a favor de la pendiente por acción de la gravedad y favorecida por otros agentes externos.



Figura 2.10. Reptación superficial en ladera (INETER,2005).

-Flujos: Es un movimiento continuo (Figura 2.11), similar a un líquido viscoso, que no preserva la estructura interna original del material desplazado, sino que adopta la morfología de la vertiente por la que discurre (Copons Llorens & Tallada, 2009).

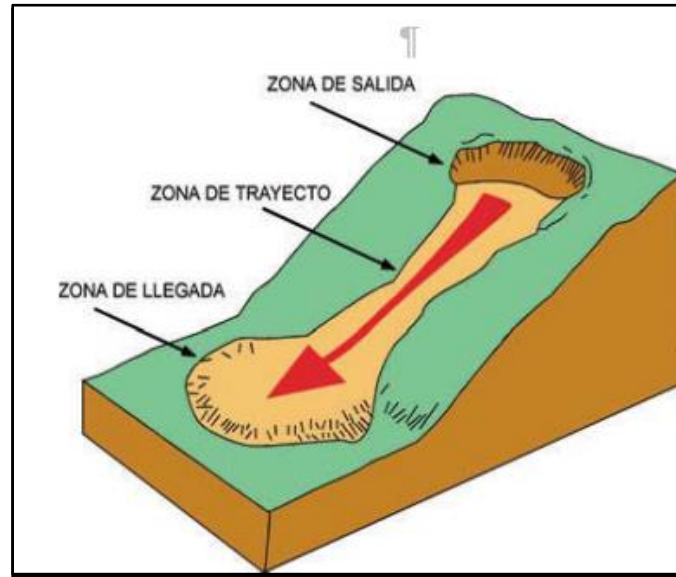


Figura 2.11. Esquema de una colada de flujo. (Copons Llorens & Tallada, 2009).

-Deslizamientos: Es el movimiento de una porción de terreno a través de una superficie de rotura neta (Figura 2.12) con la preservación general de la estructura interna original (Copons Llorens & Tallada, 2009). Presentan una superficie de deslizamiento y provoca cambios notables de la estructura del suelo (INETER, 2005).

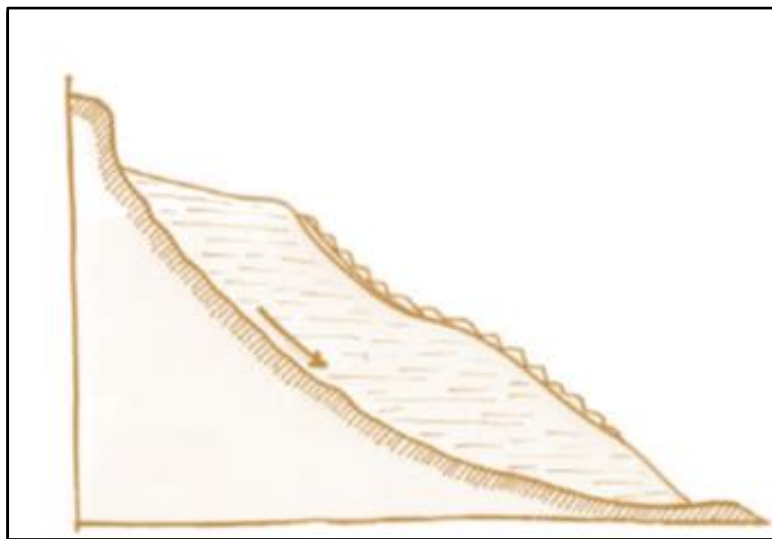


Figura 2.12. Esquema de deslizamiento pelicular (INETER, 2005).

2.2.1.3 Evaluación de la inestabilidad de terreno

El rompimiento de los materiales en las laderas ocurre cuando la fuerza de gravedad excede el esfuerzo de la roca o suelo que conforman la ladera, el material desplazado puede movilizarse de forma lenta (milímetros por año), rápida y extremadamente rápida (metros/día). La inestabilidad está dada por múltiples factores que rara vez actúan solos, estos se dividen en factores condicionantes y desencadenantes

- **Factores Condicionantes**

Son varios factores que inciden en los movimientos de masa y son relativos a la naturaleza: el factor geológico abarca lo que es la litología, estratigrafía, discontinuidades estructurales y la alteración de las rocas, el factor hidrológico o hidrogeológico siendo el cambio en las presiones de poros o hidrostáticas y el comportamiento geomecánico (resistencia a la deformabilidad, compresibilidad, cohesión, etc.), factor geomorfológico, tomando en cuenta áreas con altas pendientes, geometría de las laderas y topografía, otro factor importante es el clima. (INETER, 2005)

- **Factores Desencadenantes**

Son los factores que detonan la inestabilidad en la ladera, estos factores son de origen natural: las precipitaciones prolongadas, infiltración de las aguas pluviales en el suelo, las variaciones de temperatura, los sismos; y de origen antrópico: deforestación, incendios forestales, cortes en las laderas, el asentamiento humano en los taludes, uso indebido del suelo, (INETER, 2005).

Criterios recomendados para la evaluación de la amenaza por movimientos de terreno

La inestabilidad es el resultado de la interacción de los factores condicionantes y factores desencadenantes definiendo la probabilidad de ocurrencia e intensidad, para lo cual:

$$\text{Intensidad} = f(\text{Fc} \times \text{Fd})$$

$$\text{Nivel de amenaza} = f(\text{Intensidad} \times \text{probabilidad de ocurrencia})$$

Intensidad= f (velocidad de la masa, superficie afectada, volumen y grado de afectación, alcance de la masa, altura del talud, tamaño de bloques, etc.).

Probabilidad(P)= f (actividad, causas condicionantes, causas desencadenantes).

- Para los deslizamientos rotacionales la amenaza está dada por:

$$V = \frac{(\Pi)(W_r \cdot L_r \cdot D_r)}{6}$$

Donde:

W_r o A_r: Ancho de la superficie de ruptura.

L_r: Longitud de la superficie de ruptura.

D_r o P_r: Profundidad de la superficie de ruptura, mediante perpendicular a la topografía original del terreno.

- **Para los deslizamientos traslacionales o planares:**

$$V: L \times W \times D$$

Donde:

L: Longitud del bloque a moverse.

W: Ancho del bloque a moverse.

D: Espesor del bloque o capa de material potencialmente inestable.

Las velocidades se pueden obtener mediante técnicas de observación directa y monitoreo utilizando registros de al menos 2 años, para Nicaragua se utilizan los siguientes criterios.

-Velocidad baja: $V < 2 \text{ cm/año}$.

-Velocidad media: $V < 2 \text{ cm/año}$, $= 10 \text{ cm/año}$ ($V: \text{dm/año}$).

- Velocidad alta: $V < 10 \text{ cm/día}$ o Desplazamientos $> 1 \text{ m}$ por evento.

- **Para la determinación zonas potencialmente inestables ante derrumbes o caída de bloques se pueden utilizar indicadores de campo sencillos:**

-La alteración o intemperismo en zonas rocosas o acantilados con fuerte pendiente.

- Afloramientos de rocosos donde haya presencia de fallas, diaclasas, juntas.
- Existencia en la base del talud de conos coluviales con fragmentos angulosos.
- Laderas sin cubierta vegetal en lugares activos y abundante en zonas inactivas.
- Arboles vivos sobre el afloramiento rocoso.
- Nombres de lugares característicos tales como: El derrumbarero, el pedregal, las piedras, etc.
- Historias de pobladores de las zonas.

La intensidad de la Caída de bloques y derrumbes es medida a partir de la energía cinética que se genera por el bloque desprendido, el potencial de daño es asociado a la capacidad de alcance y al volumen o diámetro del bloque y para el cálculo de volúmenes se recomienda utilizar fórmulas que relacionen los movimientos de ladera ya sea por triángulos, rectángulos, etc.

- **Para flujos de rocas, detritos o suelo:**

Su intensidad puede también ser medida utilizando los parámetros de volumen y alcance del material desplazado.

Ocurrencia o frecuencia de inestabilidades de ladera

Se utilizan criterios que toman en cuenta los periodos de retorno de estos eventos los cuales se calculan con registros de eventos pasados, para lo cual se utiliza la siguiente formula:

Donde:

n: periodo de referencia (30 o 50 años, una generación).

T: período de retorno (Gumbel, etc).

P: probabilidad de ocurrencia de un evento de importancia igual o mayor que el evento de período de retorno.

Representación de la amenaza en mapas.

Un mapa de amenazas por inestabilidad de laderas, es donde se reflejan zonas que presentan características similares de frecuencia y de intensidad del evento, simbolizadas con el color correspondiente (Tabla 2.1). Si no existen registros para el cálculo de probabilidades o frecuencias, esta puede ser estimada en base a la experiencia del equipo técnico, a las consideraciones de actividad del fenómeno identificado en el campo y a criterios cualitativos de campo.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

Significado de los mapas de amenazas			
Leyenda	Pérdidas y daños previsibles en caso de uso para asentamientos humanos		Implicaciones para el ordenamiento territorial
	Zonas urbanizadas	Zonas Rurales	
Amenaza Alta	Las personas están en peligro tanto adentro como afuera de las viviendas. Existe un alto peligro de destrucción repentina de viviendas y muertes de sus habitantes.	Exposición directa a la amenaza. Grandes afectaciones y pérdidas totales o casi totales de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	Zona de prohibición e intervención inmediata: tierras no aptas para el desarrollo de asentamientos humanos ni de infraestructura importante (hospitales, etc) u ocupados de forma permanente. Areas ya edificadas o viviendas deben ser reubicadas, o protegidas con medidas de reducción de riesgo, sistemas de alerta temprana, evacuación temporal y modificación paulatina del uso de los territorios.
Amenaza media	Las personas están en peligro afuera de las viviendas, pero no o casi no adentro. Se debe contar con daños en las viviendas, pero no destrucción repentina de éstos, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar.	Exposición directa a la amenaza. Moderadas afectaciones y pérdidas parciales de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	Zona de alta restricción y reglamentación del uso y manejo de los territorios, en la cual se puede permitir cierto desarrollo de asentamientos humanos de baja densidad, siempre y cuando se realicen estudios de riesgo detallados previos y apliquen normas de construcción y obras de mitigación. Construcciones existentes que no cumplan con las normas deben ser reforzadas, protegidas o reubicadas.
Amenaza Baja	El peligro para las personas es débil o inexistente. Los edificios pueden sufrir danos leves, pero puede haber fuertes danos al interior de los mismos.	Exposición directa o indirecta a la amenaza. Bajas afectaciones y pocas perdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales.	Zona de moderada restricción y sensibilización, para el manejo del territorio, se permite el desarrollo de asentamientos humanos de baja densidad. La población debe ser informada de la existencia de potenciales amenazas para que apliquen medidas de protección.
Amenaza Residual	Existen amenazas que tienen una probabilidad de ocurrencia muy débil y que se pueden manifestar con una intensidad fuerte.	Exposición directa o indirecta a la amenaza. Bajas afectaciones y pocas perdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales	Zona de sensibilización, apta para el desarrollo de asentamientos humanos. Los usuarios del suelo deben ser informados ante la existencia de amenazas muy poco probables pero de alta intensidad.
Zona de Suceptibilidad	Zona cuyo grado de amenaza no se ha podido identificar con un nivel de precisión suficiente y que podría incluir, por consiguiente, áreas de amenaza alta. Incluye áreas protegidas por obras de protección cuyo diseño y estado de mantenimiento no se han podido verificar.	Exposición directa e indirecta a la amenaza. Relativamente se pueden esperar afectaciones y perdidas de bienes inmuebles, terrenos, animales, recursos naturales de la ladera y la vida humana.	Zona de restricción y reglamentación del uso del territorio, no apta, temporalmente, para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos, mientras no se determine su grado de amenaza por medio de investigaciones adicionales de detalle.
Verde Claro: Amenaza no detectada: ninguna amenaza conocida, o despreciable según el estado actual de conocimientos.			

Tabla 2.1. Significado de los mapas de amenaza según INETER, 2005.

Inventario de movimientos de masa

Los indicadores antecedentes muestran áreas que ya han sido afectadas por inestabilidad de laderas, cuando ocurren movimientos de terreno hay una serie de cambios en las características de las rocas y formas del relieve (INETER, 2005) lo que nos permite identificar áreas afectadas con anterioridad.

En la identificación de movimientos de terreno se utilizan una serie de tipología de indicadores por su naturaleza, tales como:

Indicadores Geomorfológicos: Terreno en pequeñas depresiones, relieve ondulado, existencia de escarpes y/o contrapendientes, etc.

Indicadores Geológicos: Afloramiento de rocas alteradas en nichos de arranque, estructuras de formas irregulares, etc.

Indicadores Hidrogeológicos: abundancia de agua, saturación de suelo, régimen cambiante de manantiales, aparición de pantanos de áreas del deslizamiento, desviación de ríos.

Indicadores Estructurales: Postes inclinados, cables tensos o flojos, casas o construcciones agrietadas o inclinadas, grietas u ondulaciones en los pavimentos, cercos desplazados, etc.

Indicadores vegetales: Existencia de plantas típicas de zonas húmedas, troncos torcidos y/o inclinados, rotura de raíces y raíces tensas, discontinuidades repentinas en la cobertera vegetal, etc.

Toponimia: Nombres de lugares que pueden sugerir inestabilidad del terreno como Cerro de Agua, Cerro partido, etc.

Históricos: Testimonios o documentos de eventos pasados.

2.3 Hipótesis

La inestabilidad de ladera en el casco urbano de San Juan del Sur está relacionada con estructuras geológicas (fallas y fracturas) que se encuentran en los alrededores y dentro del área de estudio, la incidencia de estas estructuras hace más propenso el sitio ante movimientos de terreno bajo la intervención de factores naturales, socio-naturales, geológicos, hidrometeorológicos y antrópicos.

3 Capítulo

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Enfoque de la investigación

El enfoque de esta investigación es mixto ya que se utilizó el método cualitativo para describir la litología del área de estudio e identificar las zonas vulnerables ante movimientos de masa y cuantitativo porque se midieron valores numéricos de fallas y fracturas lo cual ayudó a conocer a detalle estas estructuras, esto permitió entender que tanto inciden en los movimientos de masa.

3.1.2 Tipo de estudio

Consiste en una investigación de tipo **descriptivo**, porque fundamentalmente se basó en caracterizar un fenómeno, recopilando datos para después exponer y resumir la información de manera cuidadosa, luego se analizó minuciosamente los resultados a fin de extraer generalizaciones significativas que contribuyen al conocimiento.

Abarca lo que es un estudio **exploratorio** ya que examina un tema poco estudiado y del cual no había mucha información, la que se encontró en la etapa del trabajo de gabinete fue general del departamento de Rivas.

También es un estudio de tipo **explicativo** porque se orientó a dar respuestas a causas de eventos ocurridos en el área determinada, además explica los diferentes procesos geológicos que ocurrieron en el sitio y da posibles aportaciones que se pueden utilizar en estudios posteriores.

3.1.3 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de información y Datos.

En esta etapa se realizó un análisis detallado de estudios realizados en la zona para poder conocer el ambiente geológico del área de interés.

3.1.3.1 Recopilación y análisis de la información

Previamente a la investigación se consultó documentos, informes, reportes, diarios, artículos elaborados por otros autores relacionados a nuestra investigación, para obtener esta información se realizaron visitas a instituciones o centros de documentación tales como: INETER, CIGEO-UNAN-Managua, Biblioteca UNAN-Managua, Alcaldía de San Juan del Sur, MTI, SINAPRED.

3.1.3.2 -Análisis e interpretación de documentos

Una vez obtenida la información necesaria se procedió a leerla para poder seleccionar la de interés e importancia en la investigación realizada, posteriormente se sintetizó los documentos, mapas y fotografías aéreas para trabajarlos de manera adecuada.

3.1.3.3 Interpretación de material didáctico

Se analizaron fotografías aéreas, mapas topográficos, geológicos, reportes de minería y perforación de pozos en el área de interés, además del estudio de mapas geotectónicos que incluyen el área de San Juan del Sur.

Se digitalizó en ArcGIS el mapa geológico de San Juan del Sur (3049 IV) escala 1:50,000 elaborado por el INETER, esto con el objetivo de plasmar la litología y estructuras mapeadas por esta institución en nuestra investigación, posteriormente con la ayuda de la herramienta Arctoolbox utilizando un modelo de sobras se generó un mapa altimétrico y de pendientes los cuales fueron interpretados antes de ir a campo.

Se analizaron fotografías aéreas escala 1:40,000 del año 2004, se hizo uso del estereoscopio de espejos para poder identificar estructuras geológicas y lineamientos dentro del área de estudio, estas se trazaron en filminas colocadas sobre las fotografías aéreas.

Se procedió a realizar un mapa temático donde se plasmaron los datos obtenidos en la fotointerpretación y en los mapas analizados previamente siendo estos el mapa topográfico escala 1:50,000 con curvas de nivel cada 20 metros, un mapa de

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

relieve o altimétrico donde se puede observar las diferencias de altura en el terreno dentro del área de estudio, mapa de pendiente donde se observó el grado de pendiente y la inclinación de áreas con escarpes pronunciados, también se utilizó un modelo de sombras para reconocer lineamientos.

Cada uno de los mapas utilizados facilitaron el reconocimiento de estructuras geológicas dentro del casco urbano de San Juan del Sur y ayudo a la selección de puntos específicos para ser visitados en la etapa de campo.

3.1.4 Trabajo de Campo.

Se seleccionaron 17 puntos dentro del área de estudio (tabla 3.1), tomando en cuenta el grado de amenaza ante movimientos de masa esto se analizó mediante parámetros como grado de alteración, fracturamiento de la roca y pendiente de la ladera.

Tabla 3.1. Coordenadas de los puntos visitados

Punto	X	Y
P1	623039	1242979
P2	623203	1244731
P3	622990	1243599
P4	624791	1245505
P5	621871	1244711
P6	622898	1243454
P7	623014	1243558
P8	623110	1243905
P9	623144	1243981
P10	623364	1244516
P11	623677	1244501
P12	623843	1244614
P13	623498	1244562
P14	623203	1244731
P15	623947	1244616
P16	622106	1245234
P17	625366	1240747

Seleccionados los puntos a visitar se procedió a dividir el trabajo de campo en 4 etapas: a) descripción lito-estratigráfica de los afloramientos presentes en los puntos de interés, b) toma de dirección de las fracturas lo cual sería de utilidad en la realización del mapa geo-estructural del área, c) levantamiento de coordenadas de zonas donde se observaron movimientos de ladera y descripción de áreas inestables, d) selección de dos puntos específicos de gran relevancia en lo que son los movimientos de masa esto con el objetivo de tomar datos y muestras de suelo para realizar un estudio geotécnico.

a) Descripción Lito-estratigráfica de los afloramientos

Para esta etapa se seleccionaron los puntos mejor expuestos, se procedió a medir los estratos y describir la litología de cada uno de estos, además de que se recolectaron muestras debidamente georreferenciadas esto con el objetivo de hacer una descripción macroscópica y microscópicas de las rocas y poder exponer las características de cada una de las unidades en este documento.

b) Dirección de fracturas presentes en el área de estudio:

Haciendo uso de una brújula se midió la dirección del rumbo de cada una de las fracturas encontradas en campo, georreferenciando cada sitio afectado por estas estructuras, también se describió el arreglo de estas clasificándolos de acuerdo a lo observado en el área.

Para saber si los sistemas de fracturas corresponden a una falla se utilizaron los indicadores cinemáticos los cuales fueron: sistemas paralelos, conjugados, estructuras R y R', Relay, terminación en abanico y pliegues los cuales se observan cuando se está en presencia de una falla ya que estos se forman en zonas de deformación producidos por los esfuerzos de estas.

c) Levantamiento de coordenadas de zonas donde se observaron movimientos de ladera y descripción de áreas inestables.

Se procedió a realizar un inventario de movimientos de terreno ocurridos en el área, referenciando cada punto donde se haya dado la ocurrencia de estos eventos y se describieron parámetros como estado de la roca, presencia de estructuras

geológicas en el área, factores condicionantes y desencadenantes además de las afectaciones ocurridas a la población todo esto para realizar un mapa de zonificación del área estudiada.

d) Toma de muestra para análisis geotécnico

En este estudio se seleccionaron dos sitios representativos para realizar análisis de movimientos de masa, en este caso los sitios seleccionados fueron.: Las Pampas y El Barrio Pedro Joaquin Chamorro.

Se realizó el levantamiento de perfiles lito-estratigráficos en los barrios las Pampas y Pedro Joaquín Chamorro, describiendo visualmente los materiales que componía cada ladera. En Las Pampas, se identificaron dos tipos de materiales, una arcilla color oscuro, y rojiza de aproximadamente 1.5m de espesor y una roca blanda completamente agrietada. en el Pedro Joaquín se identificó una roca completamente fracturada, identificándose en campo como un material gravoso.

También se colectaron una serie de muestras de suelos y rocas para ser ensayadas en el laboratorio de geotecnia del IGG-CIGEO/ UNAN-Managua.

Como se mencionó anteriormente, todas las muestras se describieron de manera preliminar visual en el campo, de acuerdo al apartado ASTM D2488, titulado "Standard practice for description and identification of soils (visual-Manual procedure)" y basados en el sistema de clasificación USCS (Unified Soil clasification System); se identificaron y colocaron en bolsas plásticas, de acuerdo a la designación ASTM D4220, Titulado "Standard practices for preserving and transporting soil samples".

También se tomaron muestras para determinación de humedad In Situ, las cuales se identificaron y almacenaron en bolsas fuertes de polietileno, transparentes y con cierre hermético del tipo grip, con el cuidado de extraer completamente aire y protegiéndola de la radiación solar directa. El contenido de humedad nos permitió conocer la reducción del esfuerzo cortante de los suelos en condiciones de saturación hasta llegar a la falla.

3.1.5 Trabajos de laboratorios

Los trabajos de laboratorio se enfocaron principalmente en dos actividades: la primera consistió en caracterizar la litología de las muestras recolectadas en campo por medio de la descripción microscópica y macroscópica, la segunda actividad consistió en determinar los parámetros geotécnicos (físicos y mecánicos de los materiales) con el objetivo de realizar un análisis de movimientos en el terreno. A continuación, se describen cada una de estas actividades.

3.1.5.1 Descripción microscópica y macroscópica de las muestras recolectadas en campo

Con la ayuda de la lupa (foto 3.1. A), se describió macroscópicamente cada una de las muestras recolectadas describiendo su contenido mineralógico, tamaño de grano y génesis. Además, se elaboraron secciones delgadas para describir las muestras microscópicamente con la ayuda del microscopio petrográfico (foto 3.1. B), definiendo características como los minerales que conforman las rocas, forma de los cristales y alteración.



Foto 3.1. Descripción de muestras de rocas

Foto A) Análisis macroscópico utilizando la lupa electrónica, foto B) análisis microscópico utilizando el microscopio petrográfico.

Tomando en cuenta los datos recolectados en campo, la información geológica obtenida en los documentos consultados y los análisis detallados de las muestras, se procedió a la elaboración de la columna estratigráfica de la ciudad de San Juan

del Sur utilizando el programa ArcGIS la cual se visualiza en el mapa Geo-estructural del área.

3.1.5.2 Trabajos geotécnicos de laboratorio

En laboratorio se les practicaron ensayos geotécnicos a las muestras de suelos y rocas (Tabla 3.2). Para tal efecto se utilizaron los procedimientos establecidos por las Normas de la A.S.T.M, siendo los siguientes:

Tabla 3.2 Pruebas de laboratorio a suelos y rocas

Ensayos	Normas estándares
Granulometría de los suelos	ASTM D 422–63
Límites de consistencia (Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad)	ASTM D 4318
Clasificación de suelos	ASTM D 2487
Contenido de humedad de los suelos	ASTM D 2216
Gravedad específica y absorción de los suelos	ASTM D 854

En la foto 3.2. se observan las muestras de materiales de Las Pampas y el barrio Pedro Joaquín Chamorro usadas para determinar los diferentes tamaños de las partículas del suelo, plasticidad, clasificación, contenido de humedad, gravedad específica y porcentaje de absorción.



Foto 3.2. Pruebas en laboratorio en los Laboratorios del IGG-CIGEO/UNAN-Managua.

3.1.6 Procesamiento de datos

3.1.6.1 Procesamiento de datos estructurales

Para realizar el análisis estructural de los datos obtenidos en campo, se utilizó el programa STERONET, en el cual se introdujo la dirección de las fracturas azimutalmente, para ver el comportamiento de estas y su dirección preferencial, y así conocer como se ha deformado el área producto de los esfuerzos aplicados y estos a que se relacionan.

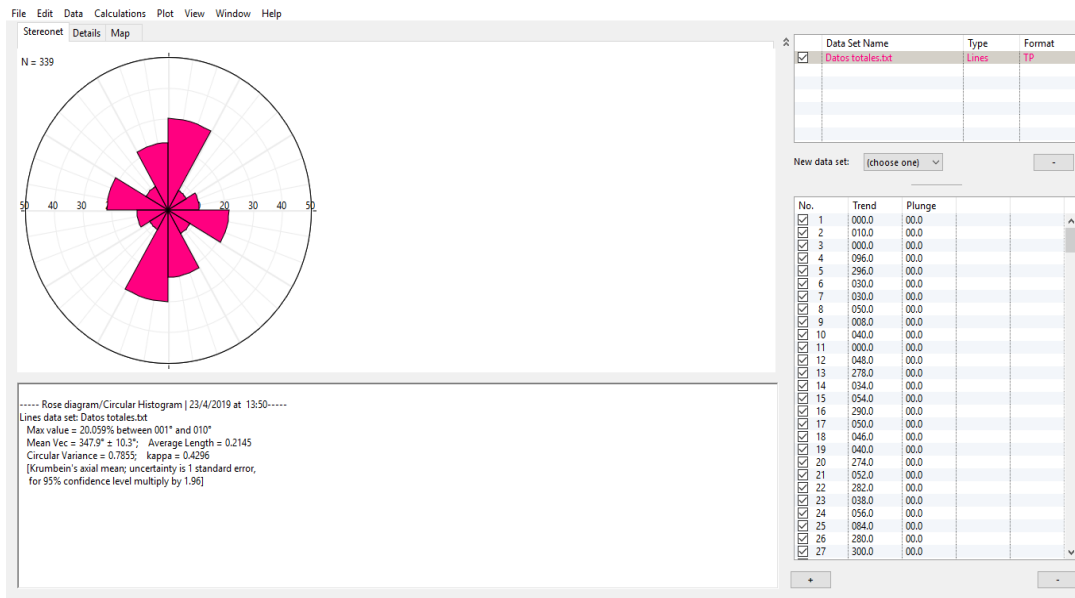


Figura 3.1. Captura de pantalla del programa STERONET.

En la parte superior se observa el diagrama de rosas, parte inferior datos estadísticos de nuestra información y en la derecha campos para insertar los datos azimutalmente.

3.1.6.2 Procesamiento de datos Geotécnicos

Finalizado los ensayos de laboratorio se clasificaron los materiales utilizando en método de Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, siguiendo los procedimientos establecidos por las Normas de la A.S.T.M, siendo los siguientes.




Para el análisis de movimientos del terreno se utilizó el software SLIDE de Rockciencias, en donde se definieron perfiles longitudinales, con sus características lito-estratigráficas y otras condiciones del terreno. En este apartado se presenta un análisis de estabilidad de terreno en un perfil del sector de Las Pampas y El Pedro Joaquín Chamorro. Los datos de entrada en este paquete son: valores de cohesión,

peso unitario y ángulo de fricción para cada suelo que definimos y nos entrega un análisis de diversos planos de falla, con su respectivo factor de seguridad. el análisis fue realizado en condiciones estáticas.

Datos de entrada en el análisis de estabilidad en el sector de Las Pampas

En la Tabla 3.3. se muestran las propiedades de los suelos y rocas usados en la modelación. Cabe señalar que los datos de cohesión y ángulo de fricción fueron considerados según la clasificación del material y estos valores fueron supuestos.

Tabla 3.3. Propiedades usadas en el modelamiento de Las Pampas

Propiedades	CH-MH (Suelo arcilloso- limoso)	CH (Suelo arcilloso)	Lutita(GW)
Color			
Peso Unitario [kN/m ³]	15.8	17.23	21.57
Cohesión [kPa]	2.45	4	40
Angulo de fricción [deg]	0	0	32

Para el análisis de estabilidad se usaron 3 métodos, estos fueron: Morgenstern - Price, Spencer y Jambu Modificado. Estos métodos se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, no toman en consideración las deformaciones del terreno.

Suponen que la resistencia al corte se pierde total y simultáneamente a lo largo de la superficie de falla. El perfil geométrico, espesores de capas está basado en resultados obtenidos en el levantamiento topográfico, levantamiento geológico y características geotécnicas (Figura 3.2). La dirección de este perfil es NE-SO. En este análisis se consideró el peso propio del material, sobrecarga de edificaciones en la parte superior idealizadas a 100 Kn/m², y sobrecargas debido a las casas ubicadas en el pie de la ladera de 30 Kn/m². De acuerdo al Reglamento Nacional de Construcción (2007) se utilizó la aceleración máxima horizontal 0.3 g y 0.1 g para la componente vertical. El nivel de aguas freáticas en esta zona se ubica a 10m de profundidad.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

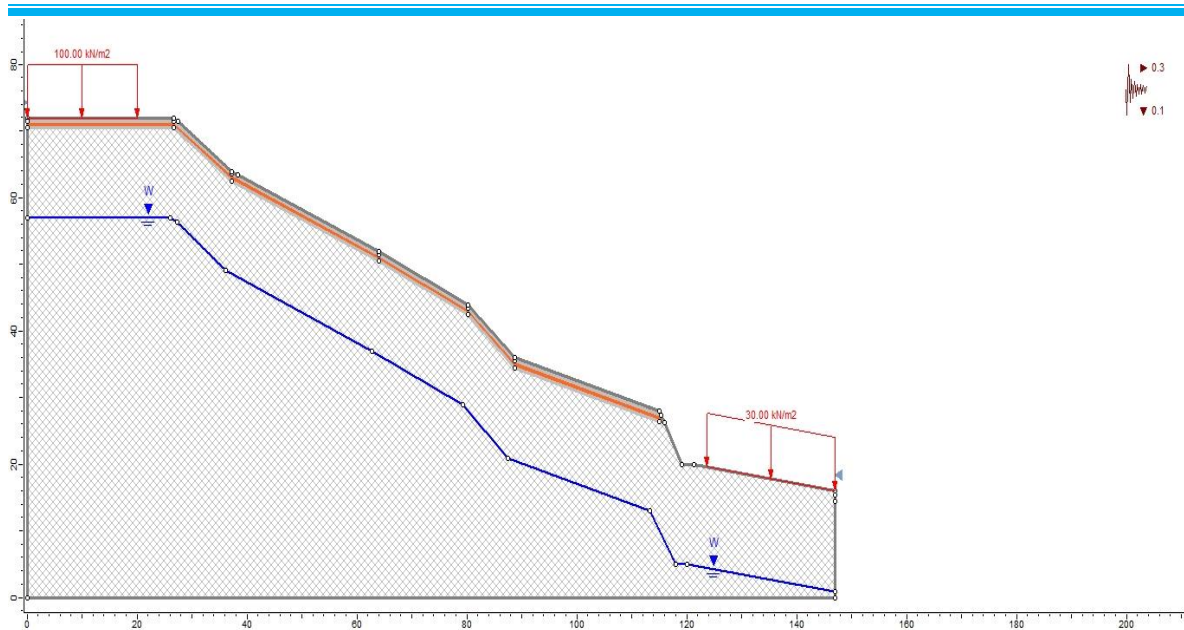


Figura 3.2. Perfil de suelos y rocas en Barrio Las Pampas

Análisis de estabilidad en el sector del Barrio Pedro Joaquín Chamorro

El perfil geométrico, espesores de capas, longitud y altura del perfil se aprecian en la figura 3.3. La dirección del perfil es NE-SO.

En este análisis se consideró el peso propio del material, sobrecarga de edificaciones en la parte superior idealizadas a 100 Kn/m², y sobrecargas debido a las casas ubicadas en el pie de la ladera de 20 Kn/m². De acuerdo al Reglamento Nacional de Construcción (2007) se utilizó la aceleración máxima horizontal 0.3 g y 0.1 g para la componente vertical. El nivel de aguas freáticas en esta zona se ubica a 2 m de profundidad.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

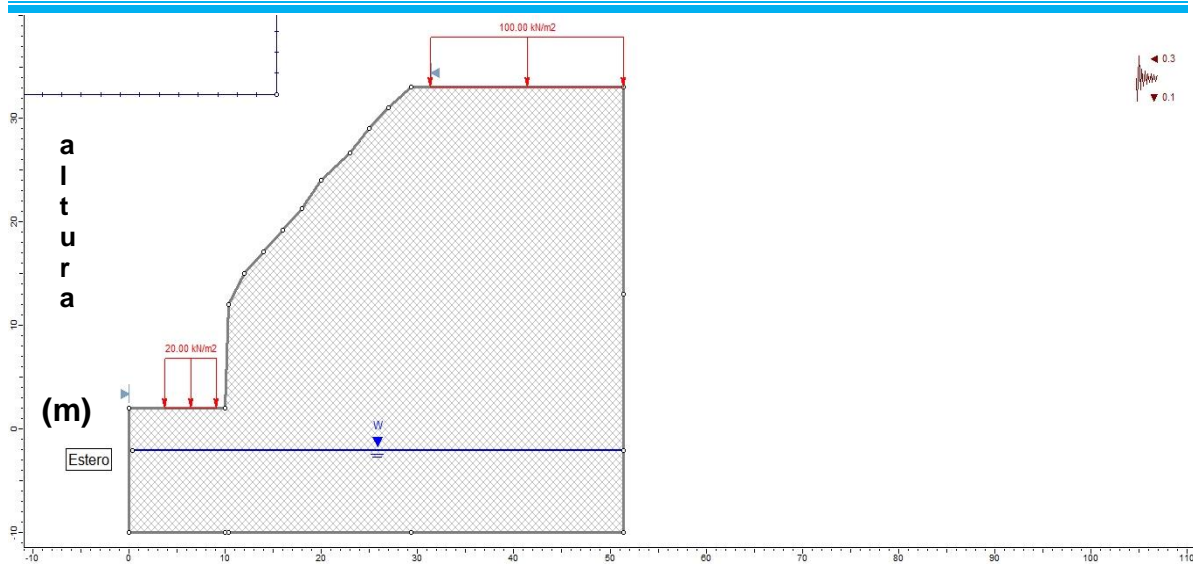


Figura 3.3. Perfil de suelos y rocas en Barrio Pedro Joaquín Chamorro

Las propiedades geotécnicas utilizadas en este análisis se muestran en la Tabla 3.4. Este sitio está compuesto por un único material, el cual es grava bien graduada (lutita), la roca está fuertemente fracturada, presenta el talud es casi vertical 87 grados de pendiente. Existen edificaciones expuestas tales como las construcciones de casas en el pie de la ladera y construcciones importantes en la parte superior, tomando en el modelo como sobrecargas.

En la Tabla 3.4 se muestran las propiedades con que se trabajó el modelado, los tres métodos utilizados fueron: Morgenster-Price, Spencer y Jambu modificado.

Tabla 3.4. Propiedades usadas en el modelamiento del Pedro Joaquín Chamorro

Propiedades	Lutita (GW)
Color	
Peso Unitario [kN/m³]	21.57
Cohesión [kPa]	40
Angulo de fricción [deg]	32

3.1.7 Elaboración de mapas

Una vez finalizada la etapa de procesamiento de datos se procedió a digitalizar en ArcGIS los mapas con todos los resultados obtenidos en la investigación, para la elaboración de los mapas Geológico y Estructural se plasmó la información obtenida en la etapa de fotointerpretación y el trabajo de campo comparando las mediciones de rumbos de fallas y fracturas, además que se correlacionó el tipo de roca presente en nuestro mapa base y nuestros resultados obtenidos en las descripciones en el trabajo de gabinete.

Así mismo se elaboró el mapa de inventario y zonificación de amenaza ante movimientos de terreno tomando en cuenta mapas bases del INETER y SINAPRED y los datos obtenidos en nuestro trabajo de campo. La metodología empleada para la elaboración de mapas de amenaza por movimientos de masa fue el del INETER-COSUDE 2005. Se describió el fenómeno, tipología y formas de manifestación clasificando la inestabilidad de laderas según Varnes. Los criterios recomendados dicen que la inestabilidad de una ladera es el resultado de la interacción de factores condicionantes y del impacto de factores externos o desencadenantes, asociados a una determinada probabilidad de ocurrencia e intensidad.

También se indicaron antecedentes y potenciales áreas afectadas por movimientos de terreno. Para la elaboración del mapa de inventario se definieron criterios como: geomorfología, geología, hidrogeología, vegetación, estructurales y hechos históricos.

3.1.8 Realización del documento final

Se logró plasmar toda la información en un documento, ordenándola de manera coherente, organizando mapas, esquemas, fotos, tablas, etc. Para que los resultados fueran entendibles por el lector, finalizando el documento con conclusiones y recomendaciones que ayuden a mejorar y seguir estudiando las condiciones geológicas de San Juan del Sur.

3.2 Marco Geotectónico de América Central

América Central está tectónicamente localizada en el frente de un borde convergente destructivo, formado por la subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe (Figura 3.4). La Placa del caribe limita al Norte con la placa norteamericana, en un sistema de fallas transformantes denominada Polochic-Motagua de movimiento lateral izquierdo, hacia el sur limita con la placa suramericana, al Este con la fosa de Puerto Rico y las zonas de subducción de las Antillas menores, al Oeste con la placa Cocos. Esta placa subduce hacia el noreste por debajo de la placa Caribe, a lo largo de la trinchera Mesoamericana (Peacock et al., 2005).

En el lugar de convergencia entre las dos placas, la placa coco de tipo oceánico se dobla bajo la placa caribe de tipo continental y se forma una zona de contacto y de fricción entre los dos fragmentos de litosfera generando la actividad volcánica y sismos, grandes terremotos con magnitudes de hasta 8 grados en la escala de Richter (Strauch, 2000).

Las velocidades estimadas de subducción varían de 70 a 80 mm/año (Frischutter, 2002). Como consecuencia de esta subducción se origina la depresión nicaragüense definida por una zona alargada y paralela a la Fosa Mesoamericana según algunos autores (McBirney y William, 1965; Dengo, 1969) esta depresión comenzó a formarse a finales del Cenozoico.

A finales del Plioceno, inicia el vulcanismo que dio origen a la cadena volcánica de América Central y que en Nicaragua va desde el volcán Maderas en el Sur, hasta el volcán Cosiguina en el Norte.

América Central está dividida en dos elementos estructurales, el bloque Chortis que comprende el Sur de Guatemala, Honduras y el Norte de Nicaragua, este bloque posee corteza continental Pre-Mesozoica y en la región Norte de Nicaragua está compuesto por rocas metamórficas de Edad Paleozoica.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

El bloque Chorotega está conformado por un basamento oceánico del Cretácico con espesores de sedimentos marinos y volcánicos depositados durante el Terciario se extiende desde el sur de Nicaragua hasta el Norte de Panamá (Elming, 1998). Se ha postulado que el escarpe de rumbo N, que constituye la Falla Hess de movimiento lateral derecho marca el límite de estos dos bloques dentro del mar Caribe, aunque no ha sido bien definido.

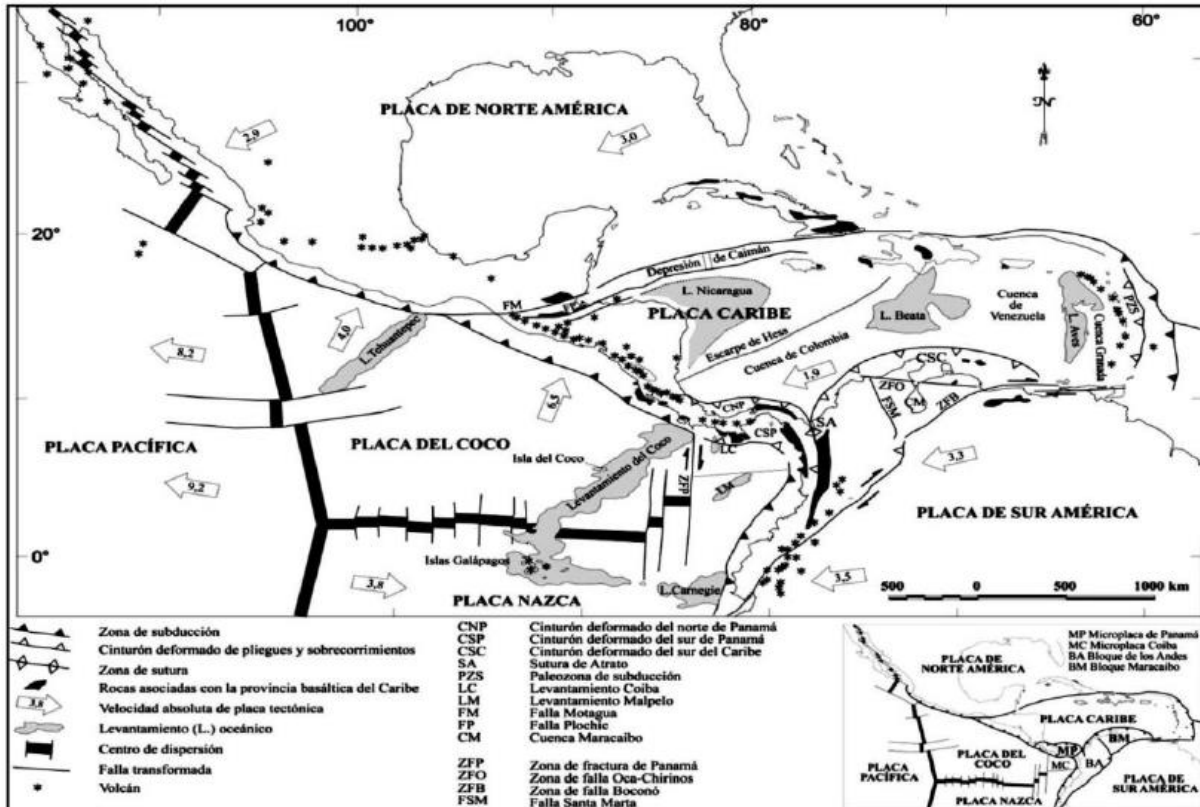


Figura 3.4. Marco Geo-tectónico de Centro América.

Tomado: (Frischbutter, 2002)

3.3 Geología Regional de Nicaragua

La geología de Nicaragua comprende una serie de procesos muy característicos relacionados con la tectónica de placas, estos procesos geológicos son diferentes en todo el país, por lo que McBirney, A., y Williams, H., 1965 dividen Nicaragua en cuatro provincias geológicas, posterior Hodgson, G (1976) agrega una provincia quedando así dividido en cinco provincias geológicas el territorio nicaragüense (Figura 3.5), las cuales son; a) Provincia del Norte, b) Provincia de la Costa del Pacífico, c) Provincia Central, d) Provincia de la Depresión o Grabén, e) Provincia de los llanos de la Costa Caribe.

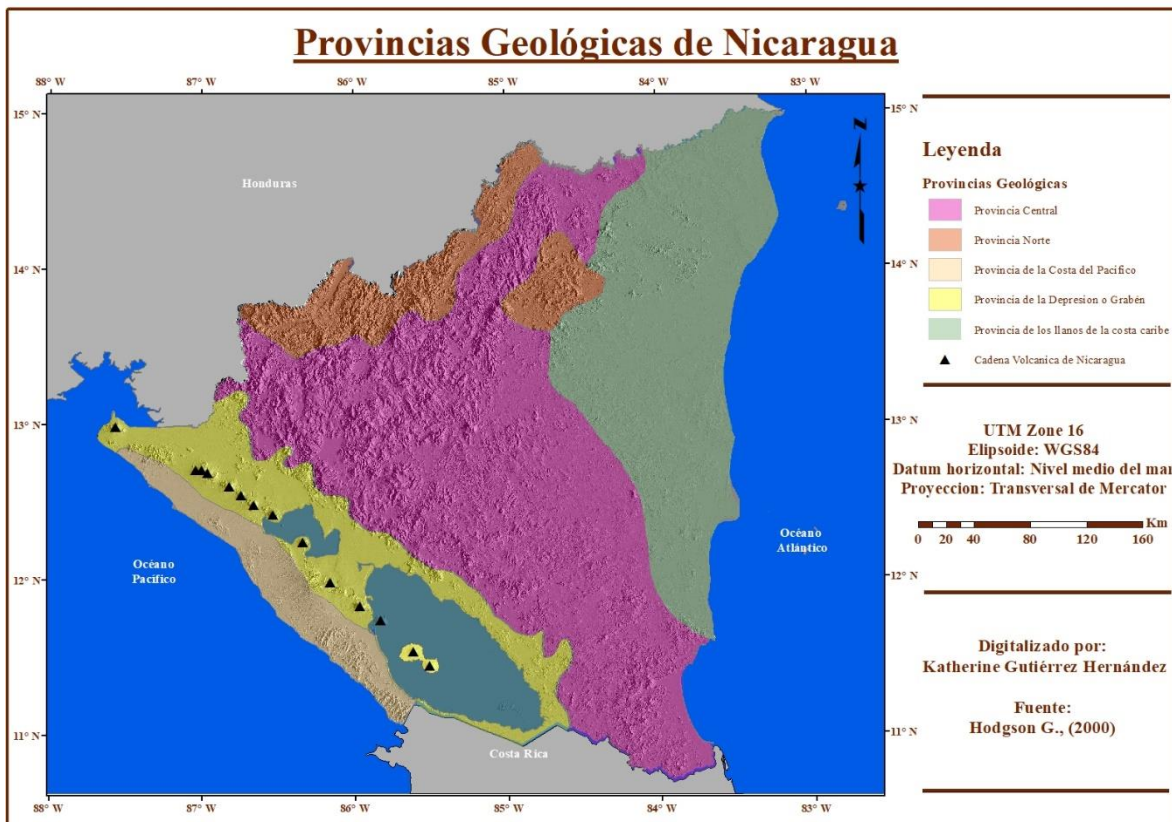


Figura 3.5: Provincias Geológicas de Nicaragua.

La configuración geológica de Nicaragua inicia en el Paleozoico, cuando se da el desplazamiento del basamento metamórfico cristalino desde el norte de Centro América hasta la parte norte y centro de Nicaragua, conformando las rocas más antiguas del país. Este basamento compuesto por rocas metamórficas como mármol, filitas, esquistos, pizarras, cuarcitas, gneises, se encuentra intruido por cuerpos ígneos plutónicos del mioceno, uno de los más importantes y conocido es

el Batolito de Dipilto compuesto por rocas de tipo granodiorita, granito, tonalita y diorita (Garayar, 1971), constituyendo la parte más baja de la corteza de la corteza continental.

Durante el Mesozoico entre el Jurásico-Cretácico inferior dentro de la cuenca del Rio Bocay en la parte Noreste de Nicaragua, ocurre una fase de sedimentación dando origen a rocas sedimentarias como arcosas, calizas, lutitas calcáreas, conglomerados, margas y dolomitas las cuales fueron incluidas en la Formación Metapán o Formación todos los Santos. Posteriormente estas rocas fueron metamorfizadas, plegadas, solevantadas e instruidas por rocas ígneas, luego la erosión y la invasión del mar causaron una deposición de conglomerados y calizas, los movimientos larámicos, el vulcanismo y plutonismo causaron la deformación de estas rocas. La formación Totogalpa (Oligoceno) marca el final de estos eventos geológicos.

Durante el cretácico al Suroeste de Nicaragua, se produjo la emersión del basamento ofiolítico con rocas características tales como grauvacas finamente estratificadas con bajo grado de metamorfismo, intrusivos ultrabásicos, calizas silíceas, pedernales, lavas basálticas en almohadilla, aglomerados y el correspondiente recubrimiento pelágico (Astorga et al., 1987). Rocas sedimentarias del Cretácico Superior (Maastrichtiano-Campaniano), fueron agrupadas como la formación Rivas, Fagginger 1942 y Kuang J., 1971, describen las rocas como una sucesión de arcosas, grauvacas, paquetes lobulares y lutitas, esta Formación presenta depósitos rítmicos de turbiditas clásticas con alternancias de lutitas y areniscas de muy finas a medias. La compresión producida por la convergencia de la placa Cocos bajo la placa Caribe dio origen a los anticlinales que se ubican paralelos a la fosa Mesoamericana (Anticlinal de Rivas, La California y el área de la Plataforma).

Durante el Terciario, a partir del Eoceno hasta el Plioceno en la Costa del Pacífico se depositaron rocas sedimentarias en una cuenca de subsidencia de ambiente nerítico y deltaico (Kuang, 1971), las cuales fueron agrupadas en las Formaciones: Brito, Masachapa, El Fraile, Tamarindo y El Salto, cabe mencionar que la Formación

Tamarindo está representada principalmente por rocas volcánicas de composición básica-intermedia-ácida Inter digitada en su parte inferior con lutitas y areniscas de la Formación El Fraile (Kuang, 1971).

En el Eoceno-Plioceno se produjo una intensa actividad volcánica como consecuencia de la subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe dando origen a una serie de unidades de rocas volcánicas, además de rocas sedimentarias epiclásticas y piroclásticas comprendidas en los grupos Matagalpa y Coyol, pertenecientes a la Provincia Central (McBirney y Williams, 1965; Parsons Corporation, 1972). Durante el Terciario medio se originó la cadena volcánica de la Sierras Isabelia, también las fisuras de Amerrisque facilitaron las erupciones de ignimbritas del Mioceno (Hunting, 1971).

A finales del Terciario e inicios de Cuaternario se creó un sistema de fallas con dirección Noroeste como resultado de esfuerzos locales de tensión, producidos por la subducción de la

Placa de Cocos bajo la Placa del Caribe, lo que favoreció la formación de la Depresión nicaragüense perteneciente a la Provincia de la Depresión o Graben de Nicaragua, presenta dirección Noroeste y está limitado por dos fallas normales paralelas, litológicamente es representado por depósitos aluviales y piroclásticos pertenecientes al Grupo Managua y Grupo Las Sierras de edad Pleistoceno y reciente, se calcula un espesor aproximado de 2000 m para los depósitos que rellenan el Graben de Nicaragua (Kuang, 1971). Esta Provincia comprende toda la cadena volcánica Cuaternaria y los dos Lagos nicaragüenses, presenta fosa de mar profundo, regiones de plataforma, terremotos y rasgos tectónicos activos, La Depresión nicaragüense es un indicador de los rasgos de la actividad Cuaternaria de América central (McBirney y Williams, 1965).

Durante el Pleistoceno en los llanos de la Costa Atlántica se depositaron rocas sedimentarias y depósitos aluviales recientes como consecuencia de la erosión de las tierras altas del interior de Nicaragua, los cuales sobreyacen a las rocas sedimentarias Terciarias formando la cuenca de sedimentación La Mosquitia, además presentan ligeras extensiones de rocas ígneas, Estas rocas están incluidas

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

en cinco formaciones y un miembro: Formación Bragman Bluff, Formación Martínez, Formación Mosquitia, Formación Punta Gorda, Formación Tuoche y Miembro Kamanon (Hodgson, 1971).

4 Capítulo

4.1 Geología local

4.1.1 Litología de San Juan del Sur

El área de estudio se localiza en la parte Suroeste de Nicaragua, dentro del departamento de Rivas, formando parte de la Provincia de la Costa del Pacífico, donde predominan rocas sedimentarias pertenecientes a la formación Brito denominada así por Hayes en 1899, está compuesta por sedimentos volcánico-clásticos y carbonatos detríticos cuyo rango de edad ha sido establecido desde el paleoceno superior hasta el oligoceno inferior.

De acuerdo a los puntos seleccionados donde se realizó el trabajo de campo, se identificaron tres tipos de rocas diferentes las cuales se describen a continuación por unidades.

4.1.1.1 Unidad de Calizas

Esta unidad aflora en la parte sur y norte de la ciudad, con una coloración grisácea difícilmente imperceptible por el alto grado de meteorización en la roca, los estratos son afectados por diaclasas (Foto 4.1) se observa presencia de cuatro componentes los cuales son: terrígenos representados por minerales ferrosos en todo el afloramiento que hace variar las tonalidades a café claro, amarillo oscuro, rojizo y negro, aloquímicos que son agregados de sedimentos carbonatados que se formaron dentro de la cuenca de sedimentación los cuales están representados por ooides, fósiles, peloides, el componente de micrita representada por sedimento carbonatado menor a 5 μm de diámetro y la esparita presente en cristales de más de 5 μm de diámetro.

Morfológicamente esta unidad se hace presente dentro de una topografía resaltante y de cerros abruptos en algunos casos los estratos se pierden en profundidad.



Foto 4.1. Afloramientos de Calizas fosilíferas

Se Observan 3 afloramientos de calizas, coordenadas: A) E 623117-N 1243891, 35 msnm, B) E 623152-N 1243753, 35 msnm, C) E 622883-N 1243468, 39 msnm. Esta presenta una coloración entre amarilla y negra debido al alto contenido de óxido de hierro.

Macroscópicamente se habla de una roca carbonatada con un tamaño de grano fino, todos los afloramientos de caliza presentan meteorización radial o esferoidal, con la lupa se puede observar minerales ferrosos de color rojizo, negros y café oscuro y en algunos casos parches de carbonato de calcio (Foto 4.2), se observan fósiles de la clase Pecten.

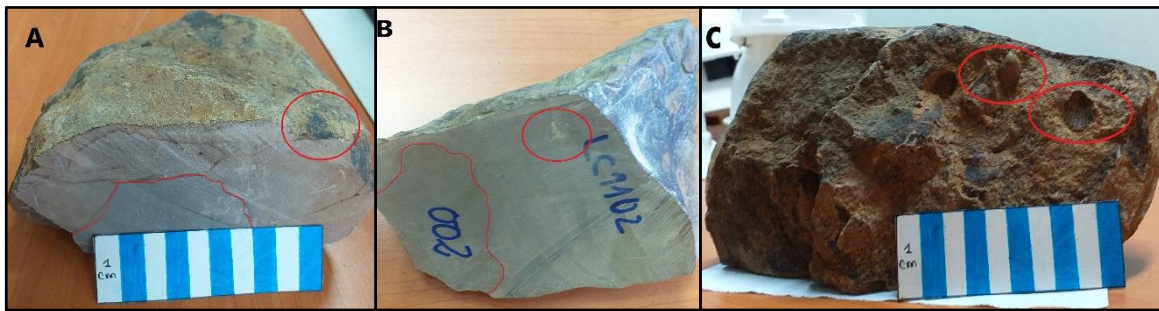


Foto 4.2. Muestras de mano de calizas

En las muestras A y B se observa que la roca presenta una meteorización esferoidal avanzada y parches de carbonato de calcio, en la muestra C es casi imposible identificar el tipo de roca, también se pueden observar fósiles de estructura tipo Pecten. Coordenadas: A) E 622898-N 1243449, 40 msnm, B) E 622106-N 1245234, 92 msnm, C) E 623014-N 1243558, 35 msnm.

Microscópicamente se observan microfósiles, minerales metálicos, fragmentos de carbonato de calcio dispersos en toda la muestra, todo esto dentro de una matriz compuesta de un barro carbonatado alterado por óxido de hierro y un cemento micrítico (Foto 4.3).

Fósiles: de tipo Radiolarios, Lentículina, Bulimina, Globorotaiia, Lepidocyclina, Fabianina cubensis, Bathysiphon, Globorotaiia hullbrookii Bolli, y también se observan fragmentos de fósiles, estos abarcan un 40% de la muestra.

Minerales Metálicos: abarcan un 20% de la muestra, se observan en tonalidades, café claro, amarillo oscuro, rojizo y negro, en algunos casos se observan, cubriendo partes de fósiles y remplazando minerales.

Matriz: cubre el 15% de la muestra, de coloración amarilla muy clara y en algunos casos de color gris pardo, se trata de un barro carbonatado con esta coloración por el alto contenido de minerales ferromagnesianos depositados en el sitio en el cual se dio lugar la precipitación.

Cemento: se trata de un cemento micrítico ferroso de color amarillento producto de los óxidos de la roca, este constituye el 10% de la muestra.

Calcita: conforma el 10% de la muestra se puede distinguir por su alta birrefringencia, su maclado y exfoliación netamente visible.

Carbonato de calcio: cubre un 5% de la muestra, casi imperceptibles, pero en algunos sectores se puede observar en forma de parches, además se observa reemplazando cristales de plagioclasas.

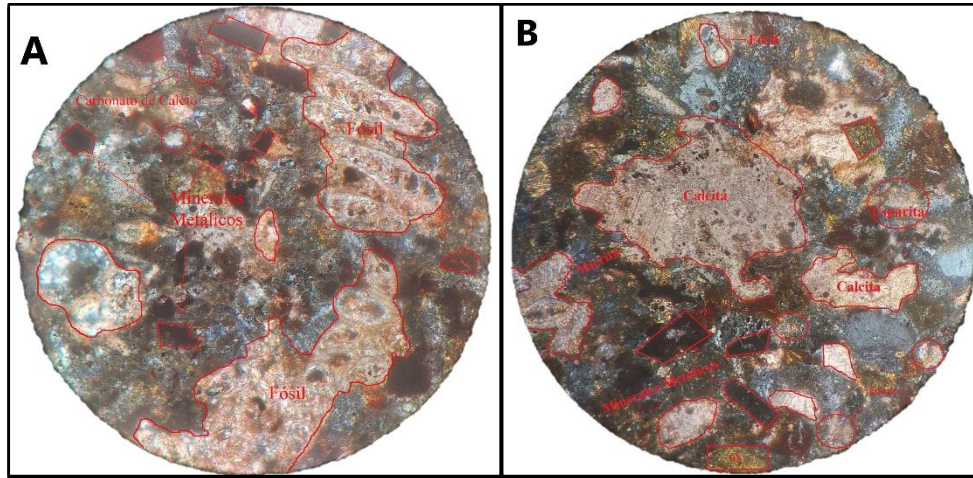


Foto 4.3. Caliza de grano fino

La fotografía muestra una caliza en sección delgada con aumento de 20x, en la foto A) se observan fósiles de tipo gasterópodos y foraminíferos algunos de ellos fueron reemplazados por micrita, se observan minerales metálicos y carbonato de calcio en pequeñas cantidades. En la foto B) se puede observar una abundancia de calcita, también es notoria la presencia de esparita todo esto dentro de una matriz carbonatada color gris pardo y un cemento micrítico alterado con óxido de hierro.

4.1.1.2 Unidad de Lutitas

Estas rocas afloran en toda la ciudad, en la parte sur se pueden observar lutitas de color ocre, en laminación de hasta 10 y afloramientos alcanzan hasta 12 m de altura (Foto 4.4). Estas varían a lutitas tobáceas o tobas arcillosas bien estratificada de color gris claro a blanco sucio en el centro de San Juan del Sur en los barrios Las Pampas y Zacarías Mora.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

Estas rocas se caracterizan por presentar un alto grado de alteración y meteorización esferoidal, además son alteradas fuertemente por carbonato de calcio este también se encuentra en estratos de hasta 4 centímetros y rellenando fracturas. Morfológicamente esta unidad está presente en llanos dentro del casco urbano y en cerros estos alcanzando alturas de hasta 100 metros dentro

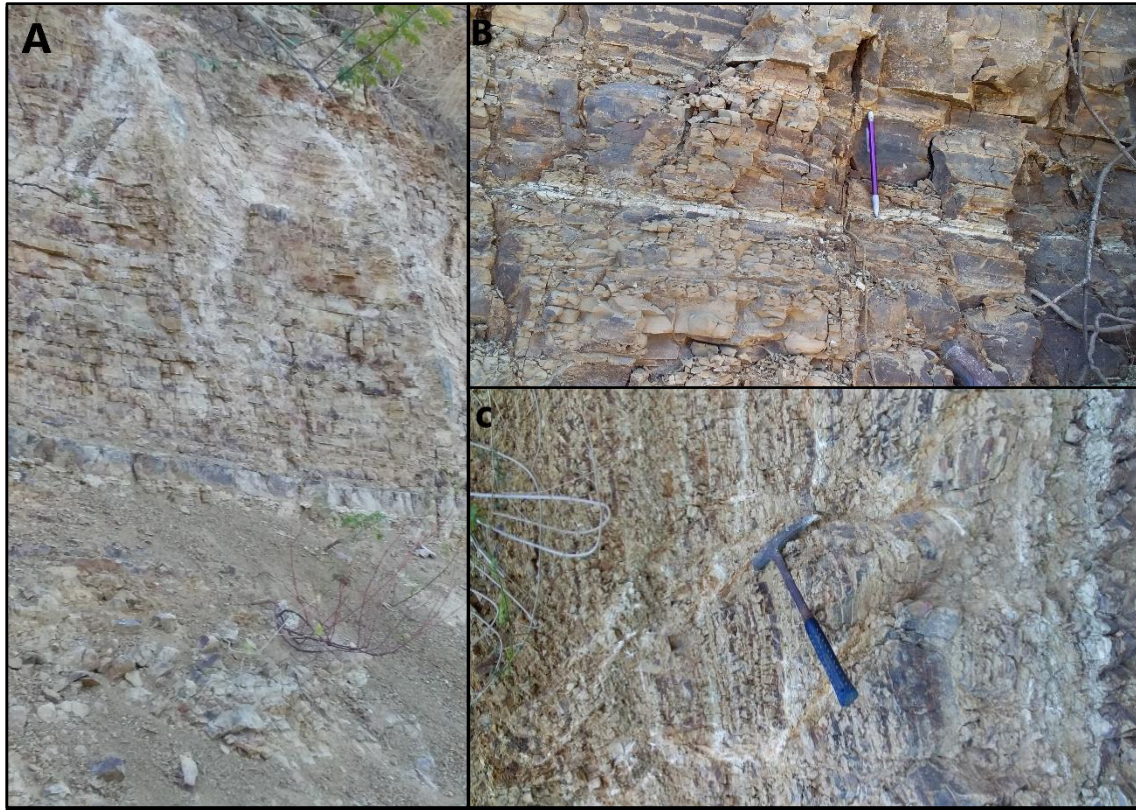


Foto 4.4. Unidad de Lutita, Carbonato de calcio en estratos y rellenando fracturas.

En las fotografías se muestra la unidad lutita fuertemente alterada por óxido de hierro y carbonato de calcio, en las fotografías A y C se observa la roca degradada producto del fuerte alteración, coordenadas: A) y C) E 623951-N 1244616, 17 msnm, B) E 623843-N 1244614, 20 msnm

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

Macroscópicamente se trata de una roca sedimentaria detrítica, de textura pelítica, se trata de lutitas no fisiles es decir se escinden en fragmentos o bloques. La variación de colores es amplia ya que se pueden observar lutitas de color ocre, café oscuro, gris claro (Foto 4.5) y en algunos casos debido a la gran cantidad de minerales ferro magnesianos le da una coloración rojiza y negra.



Foto 4.5. Muestra de mano de Lutita.

Se muestra una lutita tobácea producto de la degradación de rocas volcánicas terciarias.

Microscópicamente se puede observar una matriz meramente arcillosa de color gris oscuro a café pardo, la presencia de micro fragmentos de cuarzo indica que estas lutitas fueron producto de la degradación de rocas volcánicas, además se observan cristales de feldespatos (Foto 4.6).

Matriz: La matriz abarca un 35% del total de la sección delgada, la coloración es variada, se observa una coloración rojiza, café y amarillo claro, esto debido a la gran cantidad de óxido de hierro que se depositó en la cuenca.

Plagioclasas: abarca un 35% de la muestra, se observan cristales de plagioclasas potásicas en su forma clásica prismática, pero en algunos casos fragmentadas, también se puede observar que algunos cristales fueron reemplazados en su totalidad por óxido de hierro.

Cemento: Es un material formado con posterioridad al depósito de los clastos y la matriz, se formó a partir de soluciones acuosas iónicas y coloidales que circularon

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

la roca, en este caso se trata de un cemento carbonatado, abarca el 15% de la muestra

Cuarzo: Constituye un 8% del total de la muestra, se observan dispersos en toda la sección delgada, se trata de cuarzo policristalino debido a que los cristales están orientados en direcciones diferentes. Ya que se trata de cuarzo de origen ígneo presenta sus límites cristalinos rectos.

Minerales metálicos: conforman un 7% de la sección delgada, se encuentran distribuidos de manera irregular por toda la sección con aspecto alotriomórfico. Aparecen asociados con bordes de los cristales de plagioclasas que posee la muestra, algunos se encuentran inmersos en la matriz.

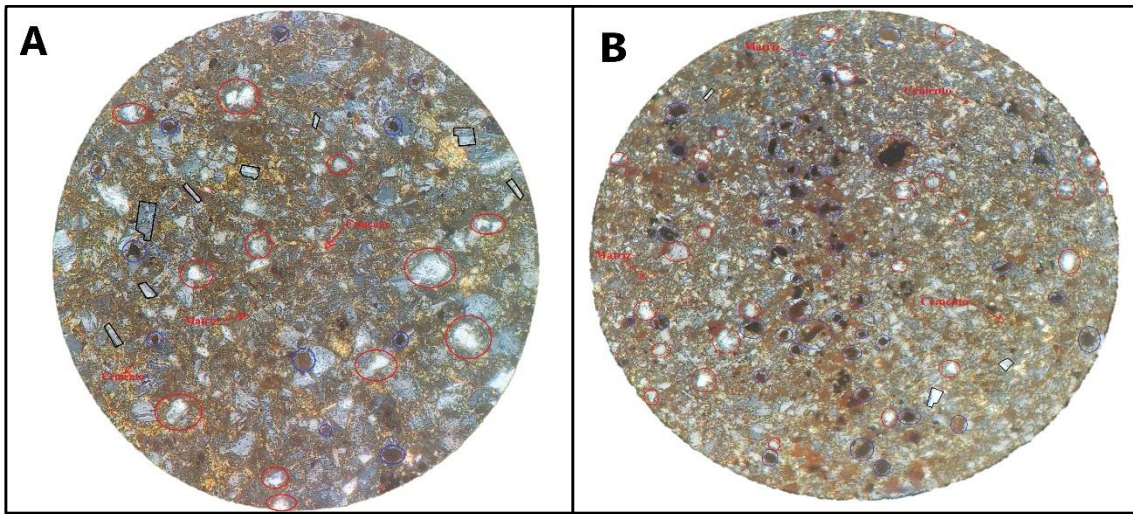


Foto 4.6. Unidad Lutita en sección delgada

Se puede observar la unidad lutita en sección delgada en aumento de 40x, en las fotografías se muestra en coloración rojo fragmentos policristalinos de cuarzo amorfo, en negro fragmentos de cristales de plagioclasa inmersas en una matriz ferrosa y en azul abundantes minerales metálicos.

4.1.1.3 Unidad de Arenisca

Arenisca Fosilífera

Esta unidad aflora en la parte Sur y Norte de San Juan del Sur, dentro de los puntos de estudio se pudieron colectar 2 muestras diferentes de areniscas:

La primera muestra pertenece a la parte baja del mirador de Cristo de la Misericordia (Foto 4.7), en la costa de San Juan del Sur.

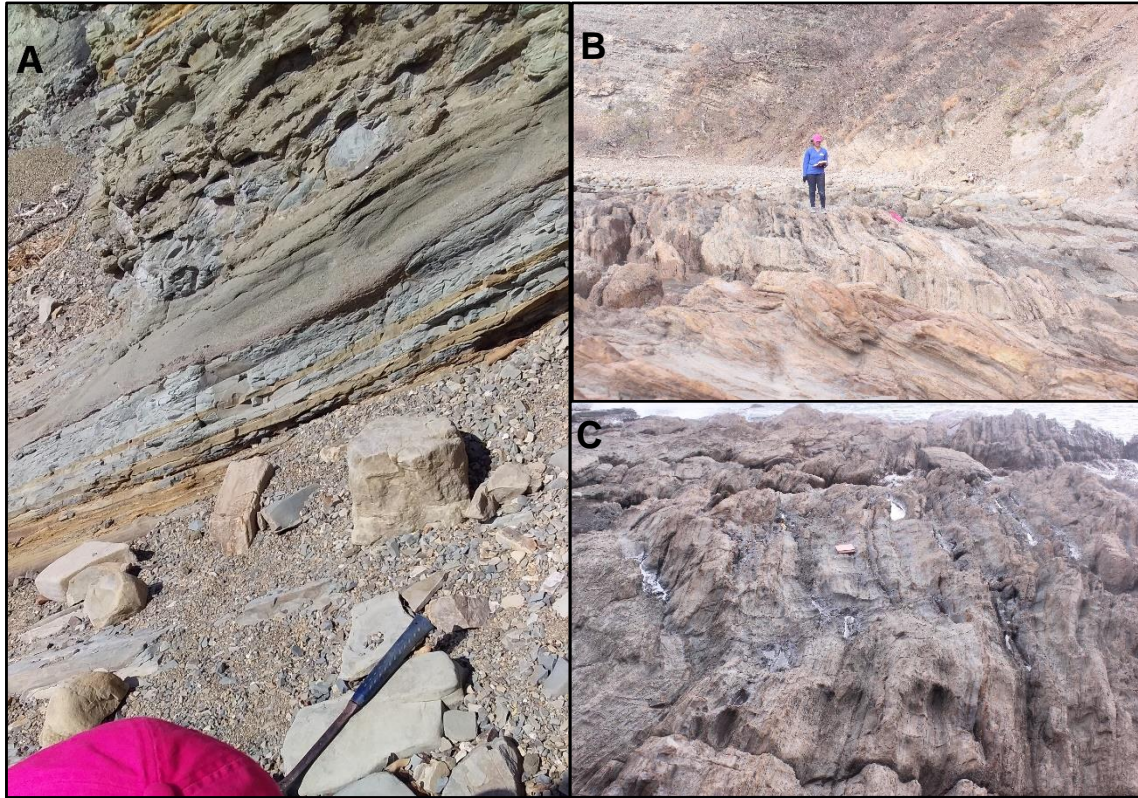


Foto 4.7. Unidad Arenisca Fosilífera

Se muestran fotos de afloramientos de arenisca fosilífera, coordenadas: E 621953-N 1244779, estos estratos han sido levemente plegados lo que es notable en la dirección de inclinación de estos ya que buzan hacia el NO, estas areniscas son relativamente jóvenes por lo que son deleznable al tocarlas.

Se trata de una roca sedimentaria tipo arenisca calcárea mal clasificada, de color gris verdoso, poco consolidada, deleznable lo que indica un estado submaduro de la roca debido a que contiene menos del 5% de matriz arcillosa, abundantes cristales de calcita de hasta 3 mm de diámetro, los clastos de rocas son de un

tamaño aproximado de 2 milímetros de composición básica a intermedia y se observan minerales metálicos (Foto 4.8) esparcidos en toda la roca.

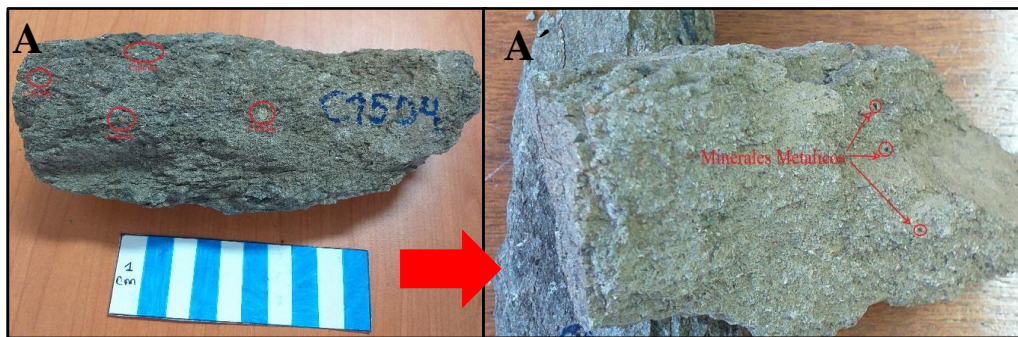


Foto 4.8. Muestra de Mano de unidad Arenisca Fosilífera.

Se observa en la fotografía la A, cristales de calcita en su forma hexagonal característica y en la foto A' se señalan los minerales metálicos los cuales son abundantes en toda la muestra, la coloración de la roca es debido a la presencia de clastos de rocas volcánicas de composición básica a intermedia.

Microscópicamente la roca presenta una cantidad considerable de líticos, fósiles, cristales de calcita, además de plagioclasas y en menor cantidad cristales de cuarzo (Foto 4.9).

Líticos: abarca un 35% de la muestra, se observan fragmentos de rocas volcánicas en la sección delgada, en algunos casos están constituidos por cristales tabulares de plagioclasas incluidos en una pasta alterada cuyo tamaño de grano es demasiado fino para posibilitar la identificación de sus componentes, también se observan cristales de cuarzo monocristalinos y policristalinos en fragmentos de líticos formados por una matriz arcillosa. Los líticos contienen bastante óxido de hierro lo que les da una coloración de café, rojizo y negro.

Fósiles: conforma el 30% de la muestra se trata de microfósiles constituidos por foraminíferos de tipo nummulites, gasterópodos y moluscos de tipo bivalvos y pecten además de restos de corales, en algunos casos estos fueron reemplazados completamente por micrita o solo se observa la forma del fósil relleno por óxido de hierro.

Calcita: Estos cristales constituyen el 20% de la muestra, en la fotografía se puede observar la birrefringencia elevada de la calcita representado por colores pastel y colores irisados, también se muestra su maclado y exfoliación característico.

Cuarzo: constituye el 7% de la muestra se trata de cuarzo sub-redondado, policristalino apenas presente en la muestra

Matriz: Gran parte de la matriz es un material arcilloso, demasiado fino para identificarse al microscopio óptico, se trata de una matriz arcillosa formada por la alteración química de los elementos presentes en la roca, en este caso la micrita representa una buena parte de la matriz, esta representa el 5% de la muestra.

Cemento: Este es un material precipitado el cual se sitúa en espacios entre clastos y fósiles, en este caso se trata de un cemento totalmente micrítico y por las características físicas de la roca (estado semi-maduro) indica que es post-sedimentación y que aún se sigue desarrollando en la arenisca, abarca un 3% de la sección delgada.

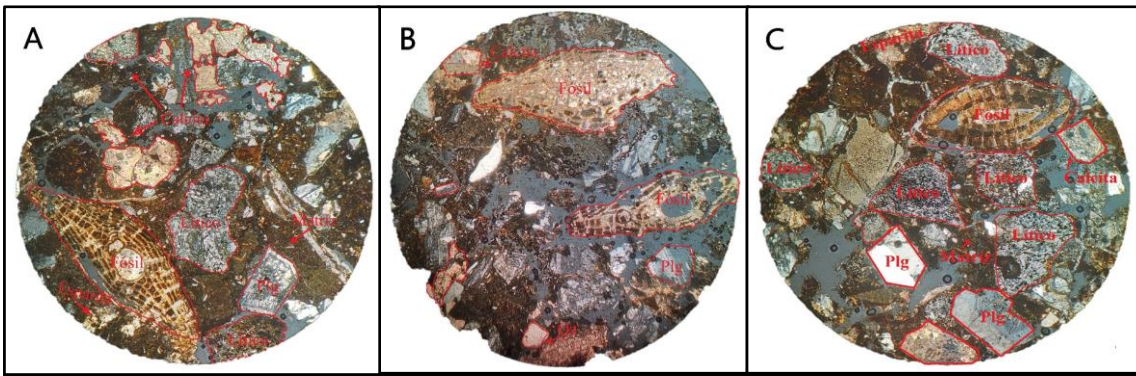


Foto 4.9. Arenisca Fosilífera en sección delgada.

En la foto A (aumento 5x), se ilustra un foraminífero discociclínido, caracterizado por el gran número de pequeñas cámaras, líticos con gran abundancia de plagioclasas y cuarzo, plagioclasas inmersas en una matriz arcillosa micrítica y cristales de calcita, en la foto B, sobre sale la presencia de un fragmento de cuarzo sub-redondado y dos fósiles de foraminíferos, en la foto C, se ilustra un Nummulites con paredes gruesas y presenta una estructura fibrosa radial, con las fibras dispuestas perpendicularmente a la pared principal. Todo esto inmerso en una matriz arcillosa, micrítica-ferrosa y unido por un cemento mayormente micrítico.

Arenisca Volcano-clásticas

El segundo tipo de arenisca identificado aflora en la parte sur de la ciudad de San Juan del Sur, siendo superpuesto por la unidad de calizas, estas son evidentes en la parte inferior del lecho rocoso, también afloran en el mirador del Cristo de la Misericordia debajo de la unidad de Lutitas (Foto 4.10), estas areniscas son rocas sedimentarias detríticas con alto grado de meteorización y fracturamiento, presenta una coloración grisácea ferroso debido a los minerales ferromagnesianos que contiene.

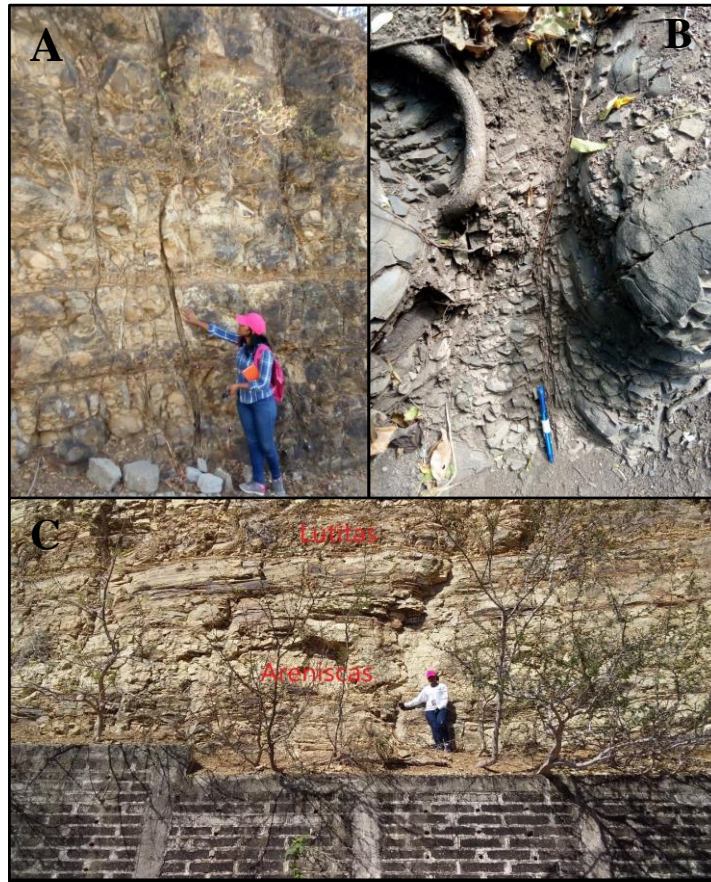


Foto 4.10. Unidad Arenisca.

Coordenadas: A) E 623152-N 1243753, 44 msnm, B) E 622883-N 1243468, 40 msnm, C) E 622106-N 1245234, 92 msnm.

Macroscópicamente se puede observar cristales de calcita en su sistema cristalino característico, también se observan fragmentos de rocas sub redondeados de tamaño máximo de 1 milímetro, es notoria la presencia de minerales metálicos (Foto 4.11), el carbonato de calcio está presente en la roca uniendo fragmentos, pero también se hace visible como agregado concentrado encima de la roca.

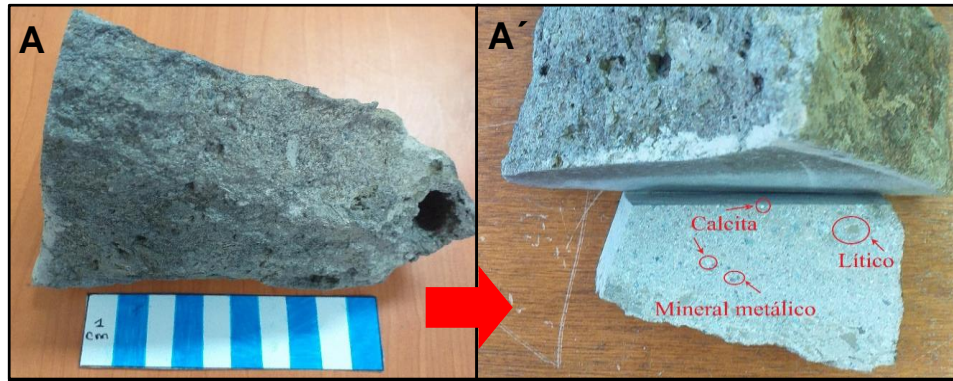


Foto 4.11. Unidad Arenisca Volcano-Clástica

Ejemplar de areniscas, en la fotografía A', se señalan fragmentos de rocas, calcita y minerales metálicos, estos componentes son en mayor porcentaje en esta unidad.

Microscópicamente se puede observar que los fragmentos de roca predominan en la muestra, también se observa cristales de calcita, cuarzo, plagioclasas y carbonato de calcio (Foto 4.12).

Fragmentos de roca: Representa un 35% del total de la muestra, son fragmentos de rocas ígneas, se observan diferentes tipos de granos y todos muestran signos de alteración. Muchos de los fragmentos de roca contienen fenocristales de plagioclasa, parcialmente alterados, dispuestos en una pasta de cristales tabulares de plagioclasas y otro mineral con tamaño de grano demasiado fino para ser identificado, varios de los granos están compuestos por cristales individuales de plagioclasa, con morfología variable, desde prismas bien cristalizados hasta granos hippediomorfos. La textura porfídica de las rocas ígneas sugiere una roca inicial volcánica.

Minerales Metálicos: Constituye el 20% de la muestra, distribuidos de manera irregular por toda la sección delgada con aspecto alotriomórfico, algunos se encuentran inmersos en la matriz.

Plagioclasas: Constituye el 15% de la muestra, se trata de cristales de plagioclasas tabulares, en algunos casos está a sido reemplazado por óxido de hierro o están siendo alteradas por este, se encuentran individuales y en los fragmentos de rocas.

Cemento: Representa el 7% de la muestra y está constituido por calcita de color amarillo pardo, en algunos sectores de la sección delgada está formado por cuarzo degradado, también el carbonato de calcio sirve como cemento uniendo clastos.

Matriz: Se trata de una matriz arcillosa, posiblemente tobácea mezclada con la degradación de cuarzo y calcita, la presencia de óxido de hierro le da un aspecto amarillo a la roca, en la sección delgada la matriz representa un porcentaje del 10%.

Calcita: esta conforma una parte importante de la muestra ya que están de manera individual en su forma característica y también sirve como cemento para algunos fragmentos de rocas, constituye el 4% de la muestra.

Cuarzo: Representa un 4% en toda la sección delgada, se trata de cristales de cuarzo monocristalino y policristalino sub redondeados, la presencia de este indica que la roca fue producto de sedimentos provenientes de rocas volcánicas intrusivas.

Piroxeno: Se observa un fragmento de piroxeno interpenetrado en los que se detalla bastante bien la exfoliación, presenta un pleocroísmo débil por lo que aparece coloreado pálidamente, representa el 3% de la muestra.

Carbonato de calcio: Microscópicamente constituye el 2% de la muestra ya que se encuentra reemplazando cristales de plagioclasas o incrustado en fragmentos de rocas, fotografía también se observa como cemento entre algunos fragmentos de rocas.

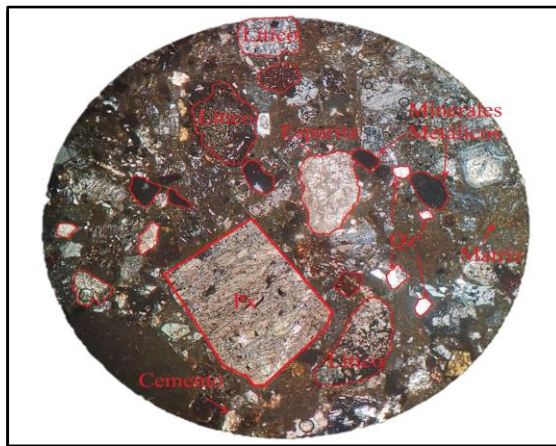


Foto 4.12. Unidad Arenisca fosilífera

Se muestra en la fotografía una arenisca lítica con aumento de 5x, estos fragmentos de rocas son formados por plagioclasas y cuarzo, también se observan minerales metálicos, calcita, un cristal de piroxeno y fragmentos de cuarzo policristalino, todo esto dentro de una matriz arcillosa carbonatada y unido por un cemento constituido principalmente de calcita.

Dentro de la ciudad predominan rocas sedimentarias detríticas de tipo lutitas y areniscas, además de sedimentos carbonatados definiéndose como areniscas fosilíferas y calizas estas últimas se definieron por el contenido de calcita, estas rocas forman parte de las rocas sedimentarias de origen volcánico de edad terciaria, esto se evidencio en las lutitas tobáceas y areniscas volcano-clásticas identificadas en el área.

El alto contenido de minerales ferromagnesianos da a las rocas tonalidades amarillas, naranja, rojas y negras, lo cual es predominante en todo el territorio, además se observa una marcada meteorización esferoidal en las lutitas y areniscas, el carbonato de calcio se observa como alteración en todas las rocas del área, además que rellena cavidades y fracturas de los afloramientos rocosos.

En el mapa geológico de San Juan del Sur (Figura 4.1) se observa que el área es parte de la formación Brito y se detalla la columna estratigráfica y el perfil geológico del área.

Mapa Geológico de la ciudad de San Juan del Sur

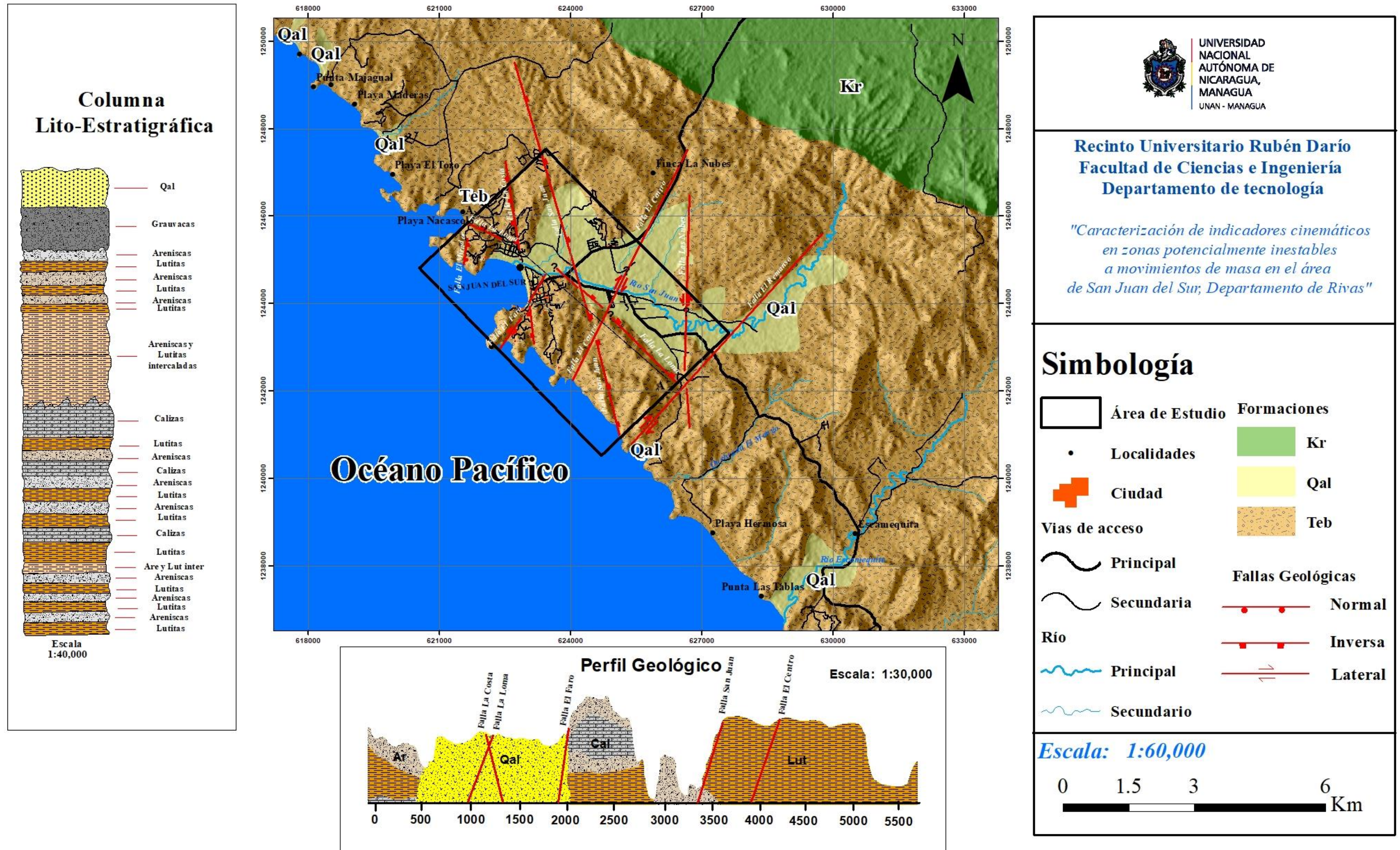


Figura 4.1. Mapa Geológico de San Juan del Sur.

En el mapa se plasma la formación Brito ya que en el territorio afloran la mayoría de los tipos de rocas, en el perfil se muestran los diferentes tipos de unidades litológicas.

4.1.2 Geología Estructural

Desde el punto de vista estructural el área de estudio es afectada por la actividad tectónica de la subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe las cuales son responsables de las principales estructuras geológicas que afectan la provincia pacífica.

Dentro del territorio de Rivas se originó el levantamiento de un bloque con dirección NO-SE, el cual va desde la frontera con Costa Rica hasta llegar a la comunidad El Higueral, este bloque se ubica al oeste de nuestra área de estudio y fue causante del surgimiento de fallas y fracturas que afectan de manera directa nuestra zona de interés.

El área de estudio se localiza en la formación Brito perteneciente a la provincia de la Costa Pacífica, esta zona localizada en la costa Pacífica sur de Nicaragua es conocida como el Eslabón ístmico y orógeno meridional de América Central, también forma parte de la zona Norte del bloque Chorotega. Ocupa una corteza ophilítica de secuencia sedimentaria de agua profunda cubierta por sedimentos de origen volcánico del terciario (Hodgson., G, 2000).

Para llevar a cabo el estudio se seleccionaron 17 puntos (Figura 4.2) dentro de la zona de interés, estos se eligieron tomando en cuenta el grado de amenaza o afectación por movimientos de masa y la observación de indicadores cinemáticos, sin embargo, para poder hacer una interpretación acertada se elaboró un análisis estructural de toda la hoja topográfica de San Juan del Sur, se evaluaron las estructuras geológicas del área y sus alrededores y se asoció a lo que se encontró en el casco urbano.

Para obtener la información geo-estructural del sitio se analizaron 4 tipos de mapas, los cuales ayudaron a determinar las estructuras principales presentes en el área de estudio, esto nos sirvió posteriormente para ver si estas estructuras están relacionadas con la inestabilidad de nuestros puntos de interés.

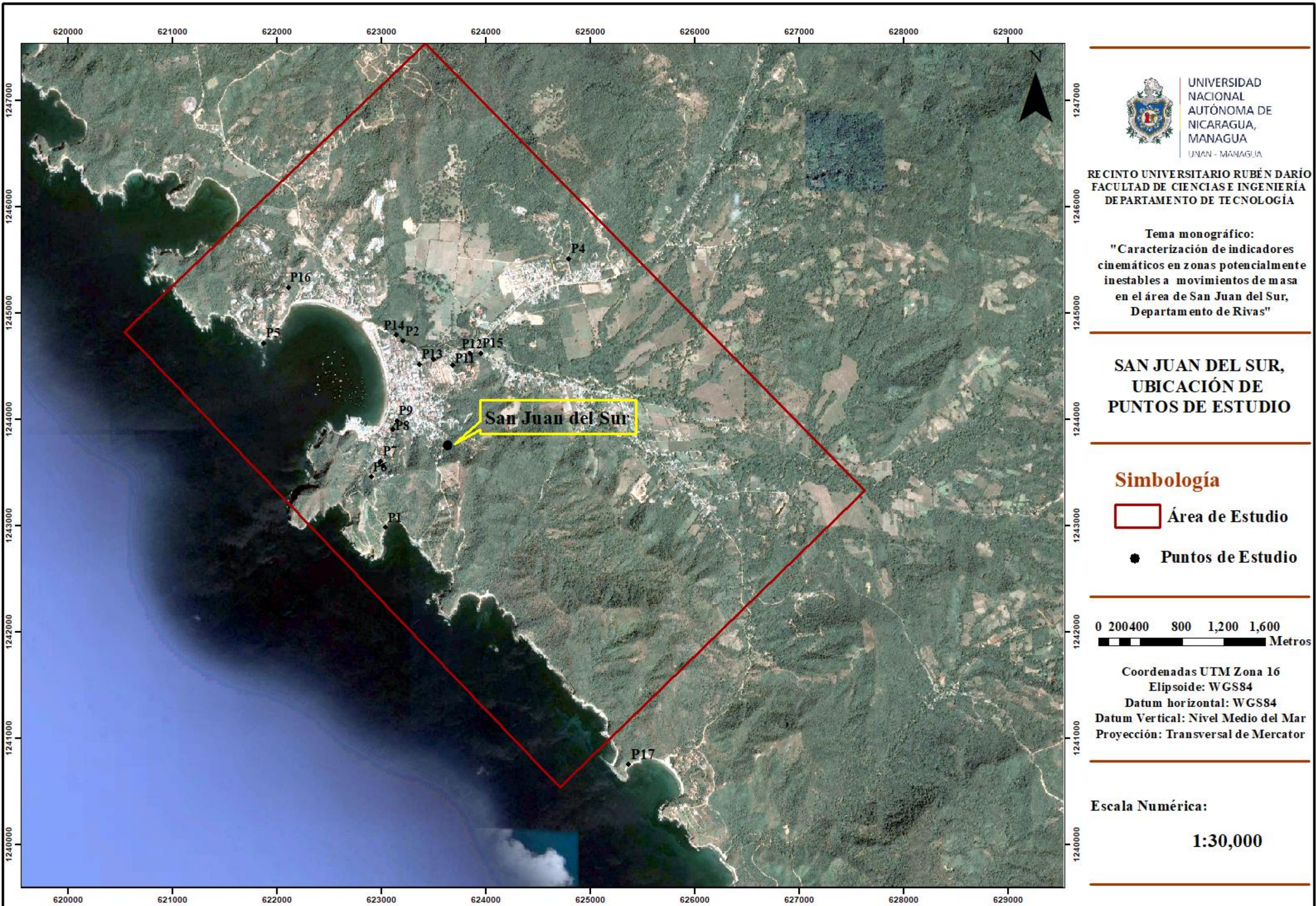


Figura 4.2. Mapa de ubicación de puntos visitados

Mapa topográfico

El mapa topográfico de San Juan del Sur (Figura 4.3) deja ver la diferencia en el relieve del sitio, tiene gran importancia para la identificación de la morfología e identificación de estructuras en el terreno, en este caso se trabajaron las curvas de nivel a 20 metros donde se observan llanuras desde los 10 metros y cerros que alcanzan hasta 450 metros, las partes bajas predominan en el área urbana del municipio y las zonas montañosas abarcan parte del casco urbano y las comunidades.

El cambio drástico en la topografía puede ser un indicador de esfuerzos tectónicos actuantes en el sitio ya que es un área costera y las alturas no deberían tener mucha variación, otro factor sería el cambio eminente en los meandros del estero, ya que este no sigue el patrón tradicional de los ríos que van en línea recta o con cambios suaves, sino que se observa que las curvas de nivel se alinean con las corrientes de este, lo cual se puede interpretar como fallas geológicas actuantes en él.

Mapa altimétrico

El mapa altimétrico (Figura 4.4) es un plano donde se plasman las elevaciones topográficas de un sitio específico, diferenciándose por medio de una variada gama de colores que llevan una sincronía, es decir, son tonos bien marcados que permite distinguir entre las áreas con menor elevación y las partes más altas.

Este mapa ayudo a la interpretación basándose en las alturas simbolizadas con una variación de colores para cada una, las zonas más bajas fueron representadas con colores de gamas bajas y las zonas altas con colores intensos. Gracias al mapa altimétrico se pudo observar al NE de la ciudad de San Juan del Sur, cerros con alturas de hasta 450 metros, al Sur y Norte del municipio prevalecen las alturas entre los 100 y 400 metros, en la ciudad las alturas van desde los 10 metros hasta los 100 metros, áreas donde la ciudad se desarrolla actualmente alcanzan alturas de 300 metros.

Gracias a la ayuda de este plano se pudieron identificar discontinuidades en cerros y lomas en el municipio de San Juan del Sur, ya que se observó que estos mantienen una secuencia constante en su elevación y en cierto sitio las alturas

disminuyen, posteriormente retoman su prominencia, esto se interpretó como discontinuidades en el sitio y posibles fallas a comprobar en la etapa de campo

Mapa de modelo de sombras

El mapa de modelo de sombras (Figura 4.5) es una representación tridimensional del relieve dentro del área de estudio, ayuda a que la apreciación de cualquier estructura sea más confiable. Con este mapa se pudo observar el relieve de la zona a estudiar, contribuyendo a la comprobación de la existencia de fallas, pliegues y lineamientos observados en fotografías aéreas y el mapa altimétrico, esto facilitó la etapa de campo, ya que, utilizando el modelo de elevación digital a 12 metros, se trazaron estas estructuras. Una vez estando en el territorio se relacionaron los indicadores cinemáticos encontrados con los resultados obtenidos del análisis de este mapa.

Mapa de pendiente

La pendiente se relaciona con la morfología y dinámica de todas las formas del relieve; prácticamente todas ellas tienen un umbral límite que las clasifica o jerarquiza de acuerdo a su geometría; es decir, la pendiente constituye un factor que favorece la delimitación de los procesos y los tipos de formas que se encuentran en el terreno.

El mapa de pendiente (Figura 4.6) es representado por una gama de colores que indican el grado de inclinación del terreno, esta a su vez constituye un factor esencial ya que ayuda a la descripción de la geomorfología del sitio de interés basándose en el cambio en la inclinación de las laderas.

Nuestra área de estudio se caracteriza por llanuras y planicies cubiertas de depósitos aluviales, así como por lomas y colinas de areniscas, calizas y lutitas, en el mapa de pendiente se puede observar que la inclinación va desde los 0° lo cual es representado por colores de gama baja hasta los 66° representado por colores intensos. Cabe mencionar que el análisis se realizó con el estado original de las lomas y colinas y no se toma en cuenta los cambios que se han realizado en las laderas ya que en varios sitios se midieron pendientes hasta de 90° producto de las acciones antropogénicas.

Mapa Topográfico de la ciudad de San Juan del Sur

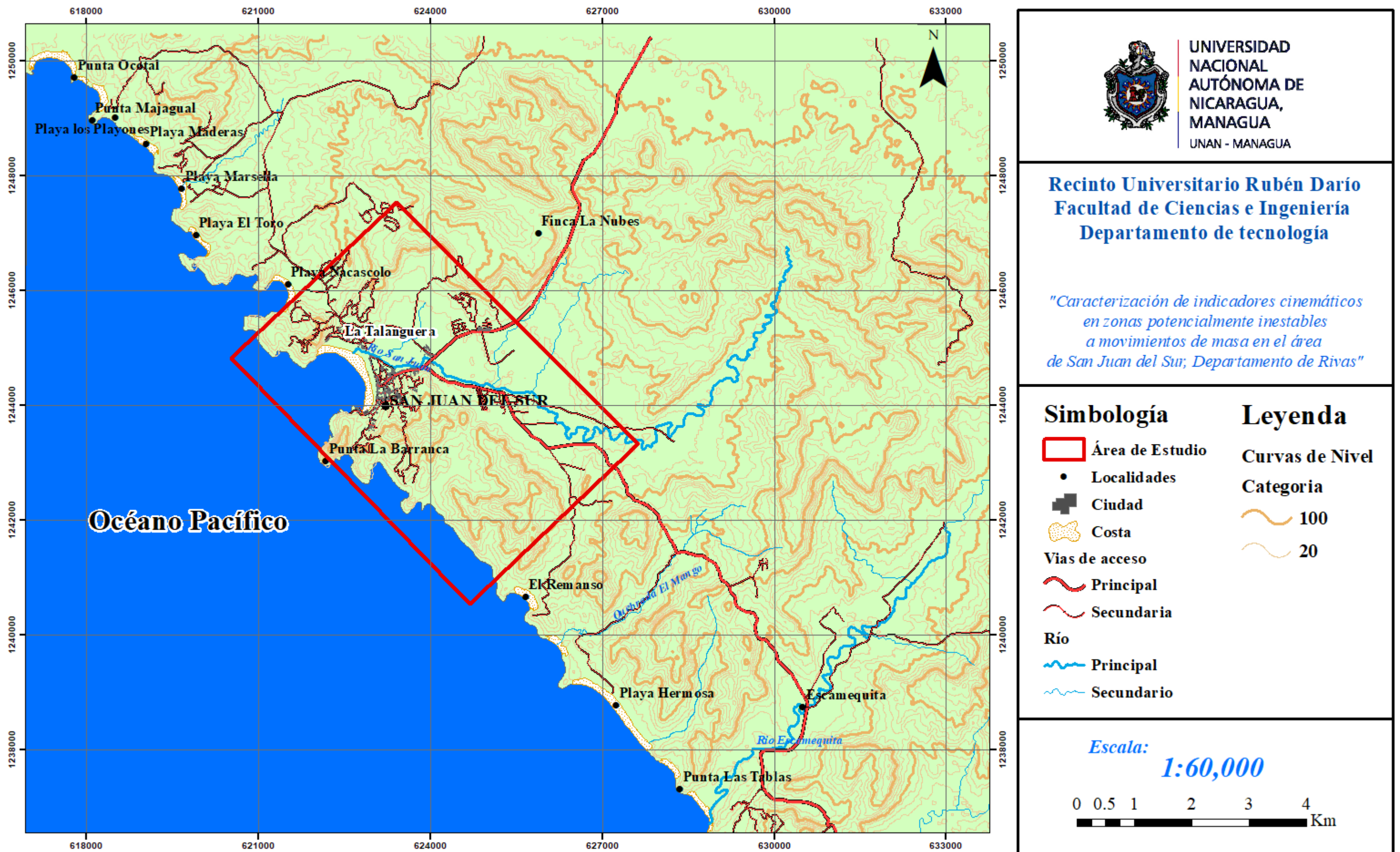


Figura 4.3. Mapa Topográfico de San Juan del Sur

Mapa Altimétrico de la ciudad de San Juan del Sur

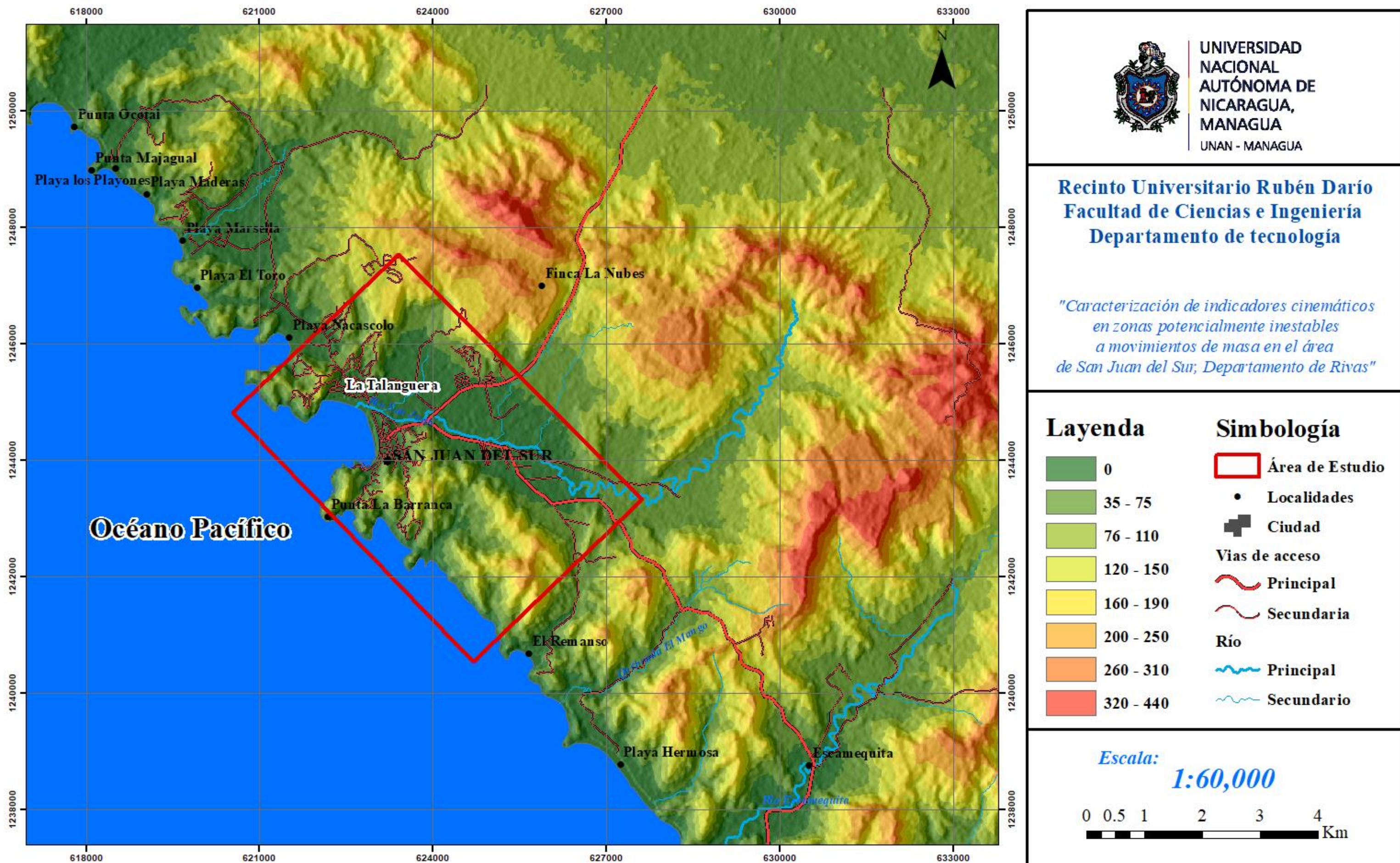
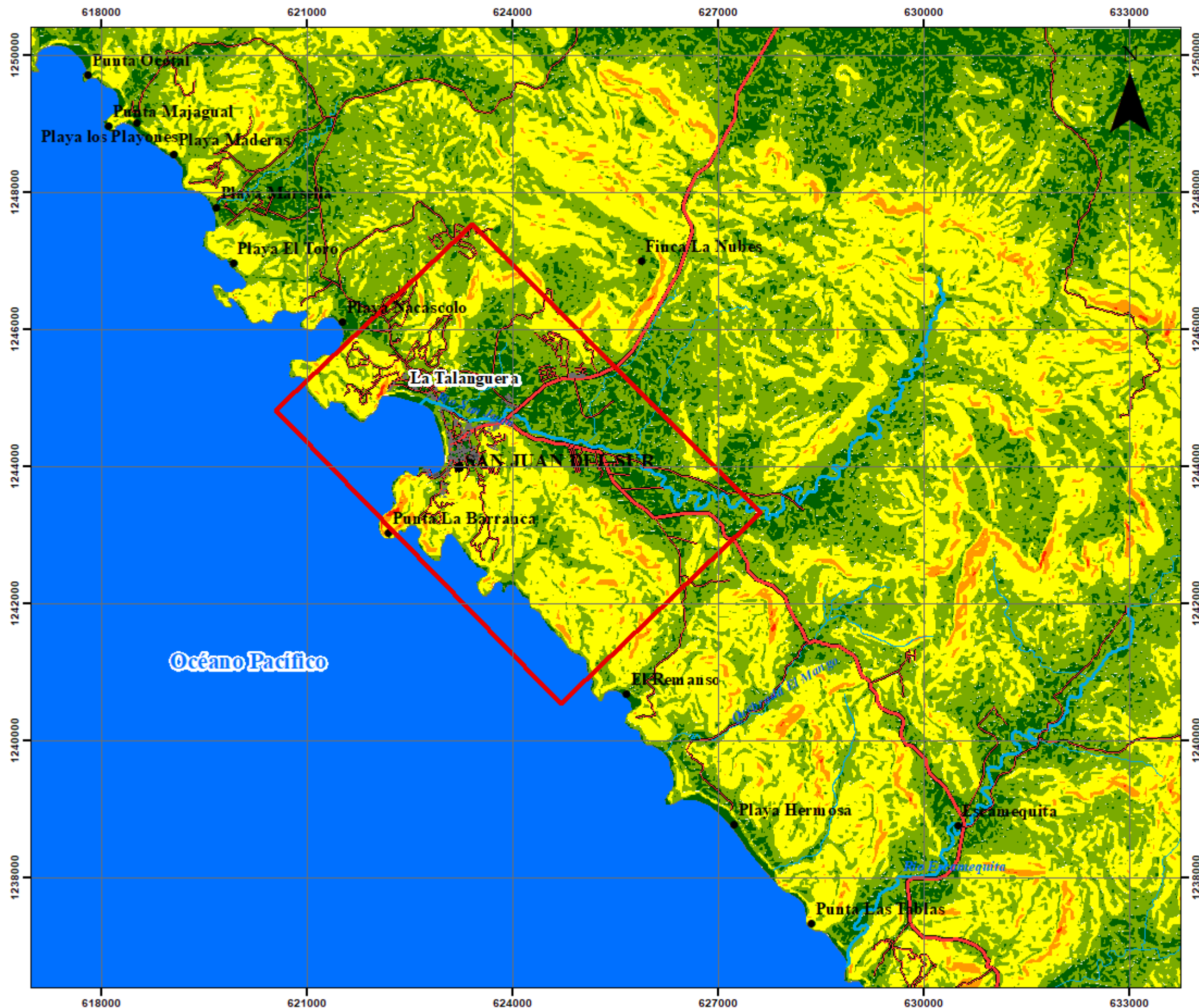


Figura 4.4. Mapa altimétrico de San Juan del Sur

Mapa de pendientes, ciudad de San Juan del Sur



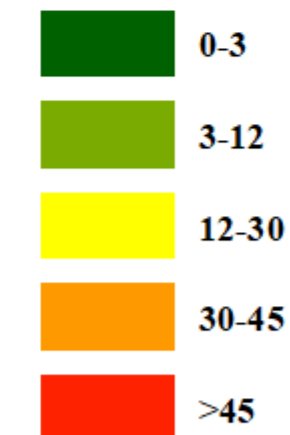
UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

Recinto Universitario Rubén Darío
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Departamento de tecnología

*"Caracterización de indicadores cinemáticos
en zonas potencialmente inestables
a movimientos de masa en el área
de San Juan del Sur, Departamento de Rivas"*

Leyenda

Rango



Simbología

- Área de Estudio
- Localidades
- Ciudad
- Vías de acceso
- Principal
- Secundaria
- Río
- Principal
- Secundario

Escala:

1:60,000

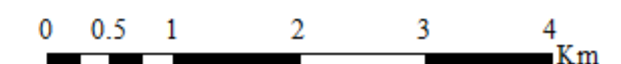


Figura 4.5. Mapa de Pendiente, San Juan del Sur

Mapa de modelo de sombras, ciudad de San Juan del Sur

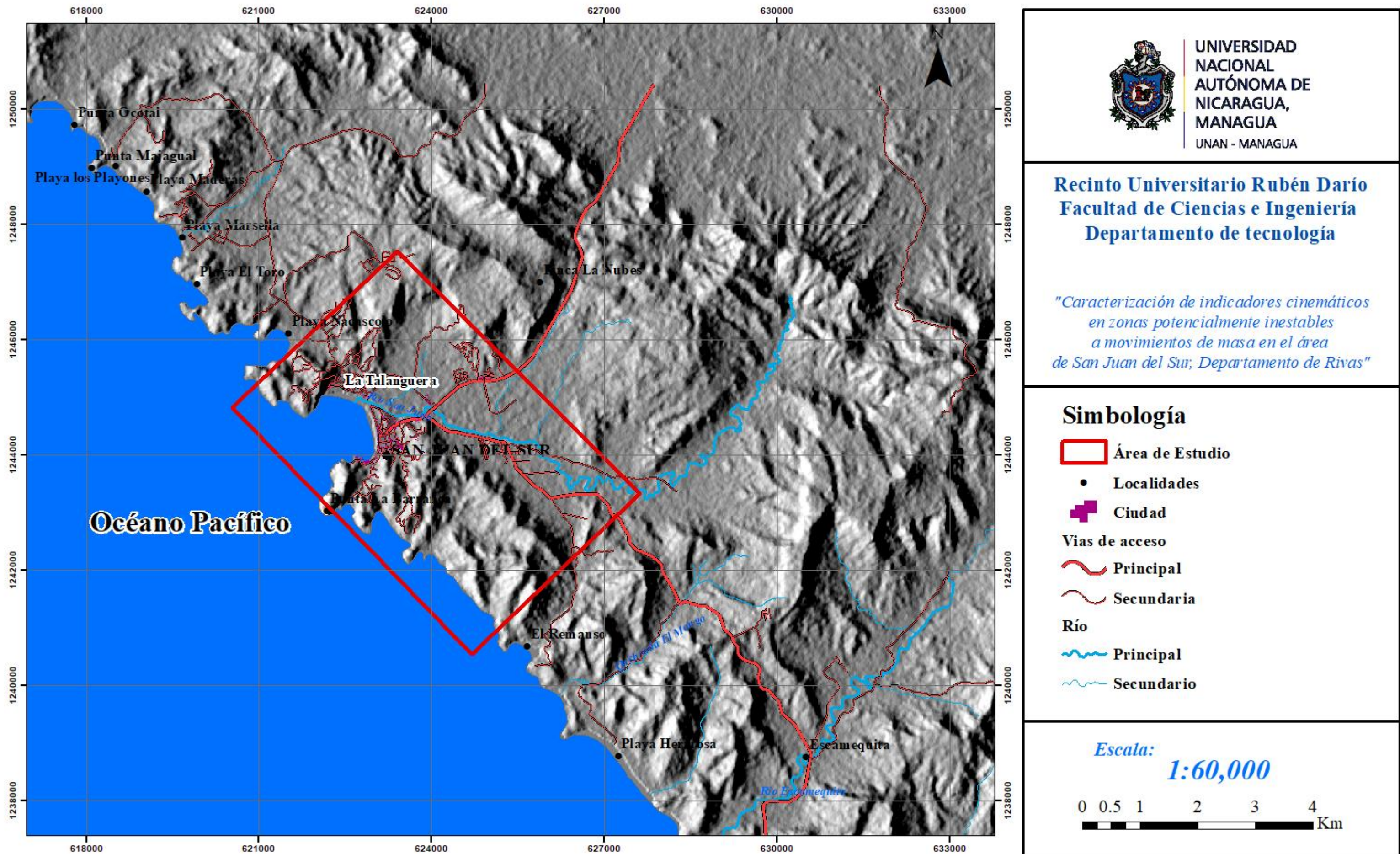


Figura 4.6. Mapa de modelo de Sombras, San Juan del Sur

4.1.2.1 Fases de Fallamiento

Los sistemas de fallas fueron interpretados a través de fotografías aéreas a escala 1:40,000, la fotointerpretación de estas se trazó dentro del área de estudio y sus alrededores para facilitar la interpretación local, posteriormente se evidenció la existencia de estas con el levantamiento de campo donde se describieron indicadores cinemáticos relacionados con estas estructuras.

Se dividió el área de estudio en tres zonas donde se realizó una roseta de fracturas por cada una de estas, la Zona Norte, Centro y Sur de San Juan del Sur. Se puede observar en la Zona Norte que el eje principal de deformación se encuentra con dirección N40°W, en la zona Centro N-S y en la zona Sur N30°E.

Zona Norte de San Juan del Sur

Esta zona ha sido bastante afectada por esfuerzos compresivos, donde las rocas sedimentarias han alcanzado su límite dúctil cediendo a la ruptura, en esta área se identificaron 4 fallas geológicas: Falla El Mirador, Falla La Loma, Falla La Costa y Falla San Juan, estas fases de fallamiento se pueden observar en el siguiente diagrama de rosas (Figura 4.7) el cual muestra la dirección preferencial de fracturas lo que se coliga con deformaciones originadas en el sitio coincidente con el fallamiento de la zona.

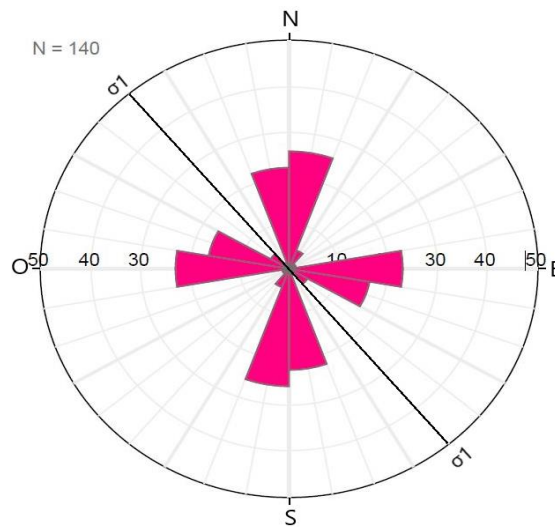


Figura 4.7. Roseta de fracturas de la zona Norte de San Juan del Sur.

Zona Central, San Juan del Sur

Esta zona se ubica en la parte céntrica de San Juan del Sur y abarca los barrios Zacarias Mora, Pedro Joaquín Chamorro y Las Pampas los cuales fueron sitios de estudio para esta investigación, ya que cuentan con afloramientos bien expuestos donde se pudieron observar indicadores cinemáticos, además que son sitios muy vulnerables ante movimientos de masa.

Como se puede observar en el diagrama de rosas (Figura 4.8) en esta zona se distingue una dirección preferencial de fracturas noroeste lo cual es coincidente con la falla La Costa, esta tiene una dirección de N10°O, la falla San Juan la cual tiene una dirección N15°O, la orientación de las fracturas hacia el noreste coincide con la falla El Centro la cual tiene una dirección de N26°E.

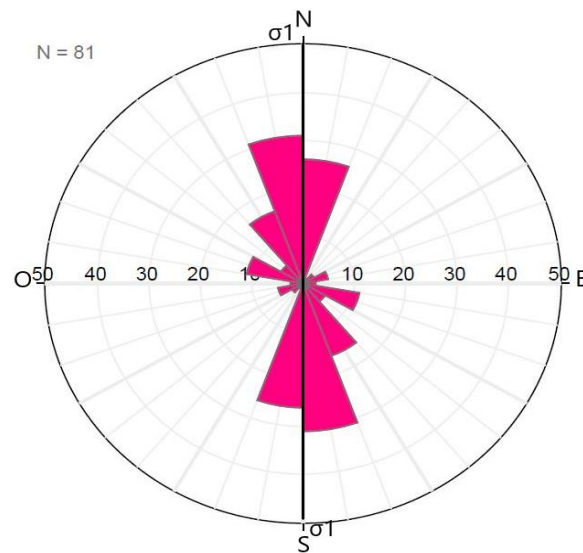


Figura 4.8. Roseta de fracturas de la zona Central de San Juan del Sur

Zona Sur, San Juan del Sur

Para evaluar esta zona se midieron afloramientos bien expuestos ubicados en el barrio Camilo Ortega y San Rafael del Valle donde se midieron estructuras para poder realizar la roseta de fracturas, podemos observar en la Figura 4.9. las direcciones preferenciales de estas van hacia el noreste, lo cual es coincidente con

la dirección de la falla El Faro y la falla Centro esta última es una estructura que afecta desde la playa Peñas Rotas hasta La Cuesta.

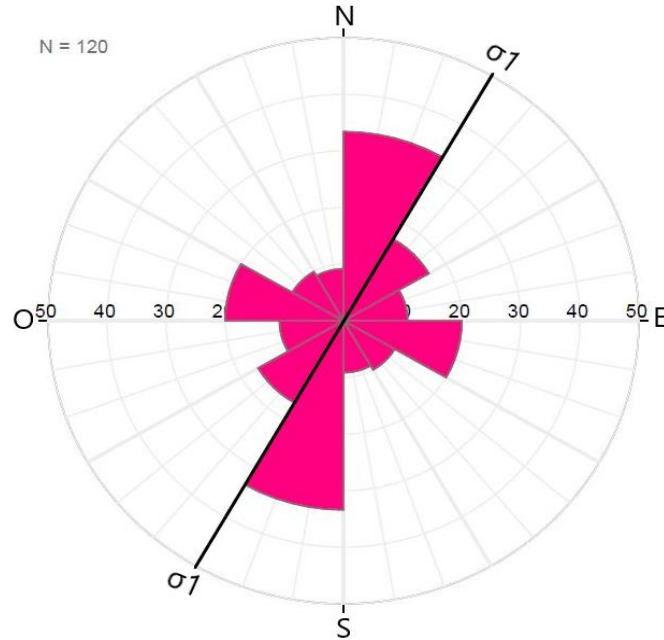


Figura 4.9. Roseta de fracturas de la zona Sur de San Juan del Sur

Para la identificación de las fallas geológicas se visitaron diferentes afloramientos dentro de la ciudad y sus alrededores, cabe mencionar que cada uno estos presentan un alto grado de fracturamiento y debido a la cercanía de las estructuras estas se relacionan con todas las fases de fallamiento del área de estudio. Sin embargo, para poder caracterizar las fallas se tomó en cuenta la dirección preferencial de las fracturas en cada uno de los afloramientos despreciando datos relacionados con otras estructuras.

Sistema de fallas El Mirador

Ubicada en la parte norte de la ciudad de San Juan del Sur, abarca una longitud aproximada de 600 metros, actúa de manera directa en la zona del mirador del Cristo de la Misericordia, las unidades de roca que afecta son areniscas, calizas y Lutitas, originando movimientos de masa en el área.

Para definir la cinemática de esta falla se describió un afloramiento bien expuesto en la zona norte de la costa de San Juan del Sur, donde a simple vista se pueden observar las consecuencias de los esfuerzos actuantes.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

Para esta falla se identificaron indicadores cinemáticos tales como: sistemas de fracturas paralelas y curvilíneas con dirección predominante N-S (Foto 4.13), estas estructuras están oblicuas a la estructura principal formando un ángulo de 7° , esto indica que se trata de estructuras Riedel, las cuales nos muestran un movimiento vertical de la estructura.

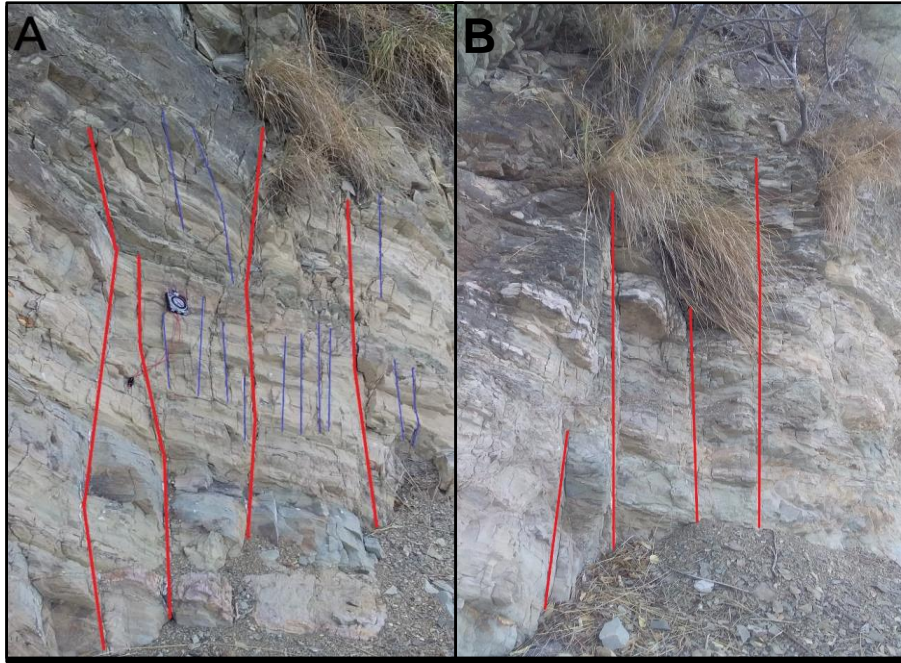


Foto 4.13. Afloramiento de Lutitas y areniscas sistema de fallas El Mirador.

La fotografía A) muestra fracturas curvilíneas y tipo Relay y la fotografía B) muestra fracturas paralelas

También se observaron fracturas en sistemas conjugados con direcciones noreste y norte-sur, estas estructuras forman un ángulo de 90° (Foto 4.14), este nos señala que los esfuerzos aplicados en esta zona están directamente relacionados de la zona de subducción de la placa de Cocos con la placa Caribe.

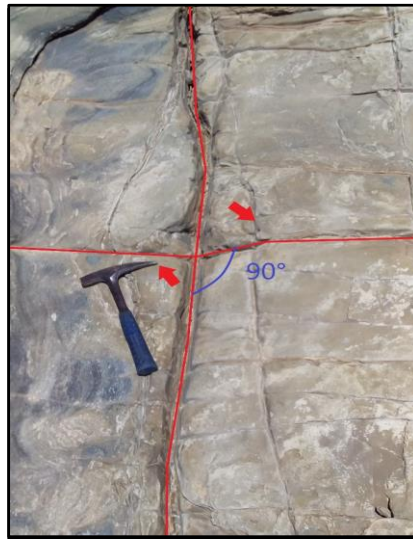


Foto 4.14. Afloramiento de Calizas, Sistema de fallas El Mirador.

Se muestra un sistema de fracturas conjugadas el cual nos señala los esfuerzos actuantes en el área de estudio con dirección E-O.

Se observaron tres fracturas de modo 3 paralelas entre sí (Foto 4.15) con direcciones N62°E y N70°E, la tercera tiene un desplazamiento de 50 centímetros y tiene un rumbo es N30°O, esta fractura a su vez está casi paralela a la falla La Loma.

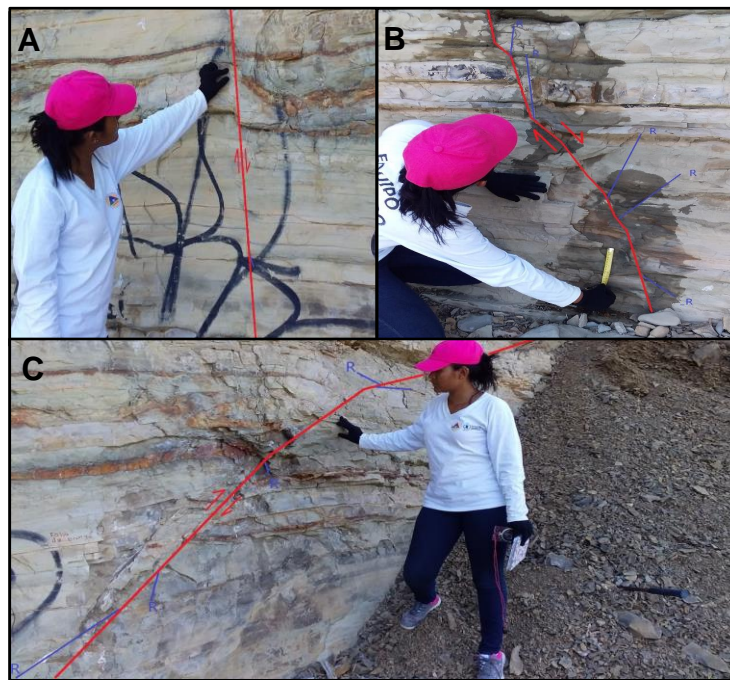


Foto 4.15. Afloramiento de Lutitas en Sistema de Fallas El Mirador

Se muestran fracturas de modo 3 con movimiento vertical ocasionado por esfuerzos compresivos.

También se observaron pliegues de funda (Foto 4.16.A) con dirección NO de hasta 40 cm de tamaño, este está rotado hacia el oeste en dirección al fallamiento antes descrito. Calcita rellenando fracturas son comunes en el sitio (Foto 4.16.B), en la fotografía tal se puede observar la mineralización de estas, la cual tiene una dirección N-S (Foto 4.16).

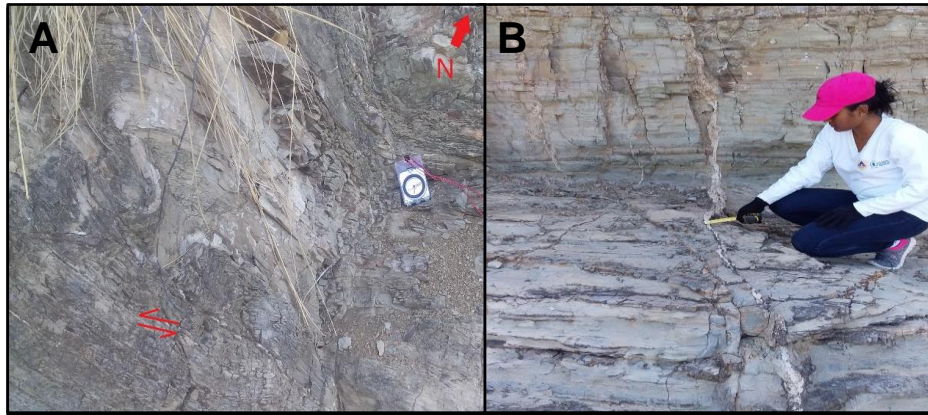


Foto 4.16. Afloramiento de Areniscas y Lutitas, mirador Cristo de la Misericordia.

Se muestra en la Foto A) Pliegues rotados hacia el oeste y la foto B) muestra fracturas rellenas de calcita.

Los estratos tienen un buzamiento de 22° hacia el oeste generalmente, pero hay una variación considerable ya que estos cambian su buzamiento a 40° ligeramente hacia el NO lo que indica que los esfuerzos compresivos actuantes en el sitio originaron un leve plegamiento en el área.

Se observó que todo el afloramiento de roca fue afectado por esfuerzos compresivos originando fracturas con un desplazamiento mínimo inverso, posteriormente otros procesos de liberación de energía ocasionaron que los bloques cayeran formando fallas normales formando estructuras en dominó (Foto 4.17).



Foto 4.17. Área del cristo de la misericordia, San Juan del Sur.

Falla El Faro

Ubicada en el sector Sur de la ciudad, esta falla abarca una longitud aproximada de 2 km, tiene una dirección de N31°E y afecta las unidades de Calizas, Lutitas y Areniscaslife, la morfología del sitio deja ver una discontinuidad entre cerros lo cual se interpretó como un lineamiento con una dirección preferencial.

Para comprobar que este lineamiento se trata de una falla geológica y conocer acerca de la cinemática de esta, se visitó la zona norte del barrio Camilo Ortega donde los afloramientos bien expuestos facilitan la observación de fracturas relacionadas con la estructura principal (Foto 4.18), en el área se midieron fracturas con dirección preferencial N18°E lo que se interpretó como estructuras Riedel, también se registraron fracturas paralelas a la estructura principal.

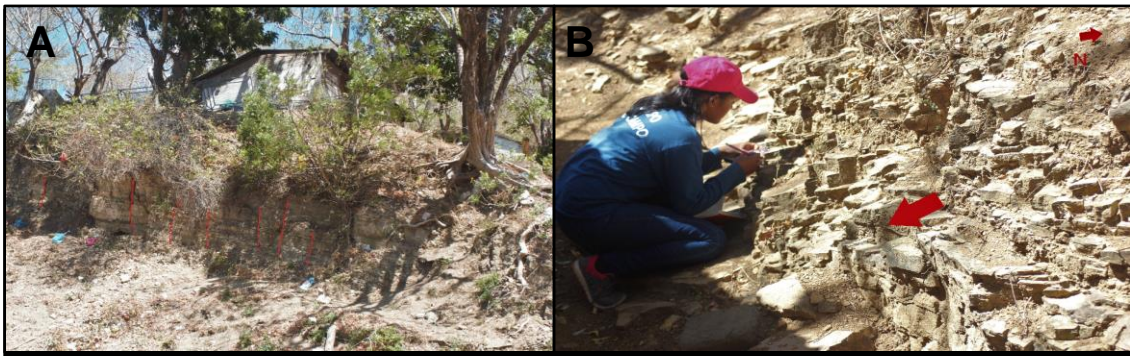


Foto 4.18. Unidad de Lutitas, Falla el Faro

En la Foto A) se observan fracturas paralelas deformando el sitio, Foto B) zona de cizalla acusando el sentido de movimiento de la falla El Faro.

Hacia el sur del barrio Camilo Ortega se observó una pared totalmente deformada en la cual las fracturas curvilíneas alcanzan aperturas de hasta 7 centímetros, las rocas afectadas son Lutitas altamente meteorizadas con un alto grado de alteración por óxido de hierro.

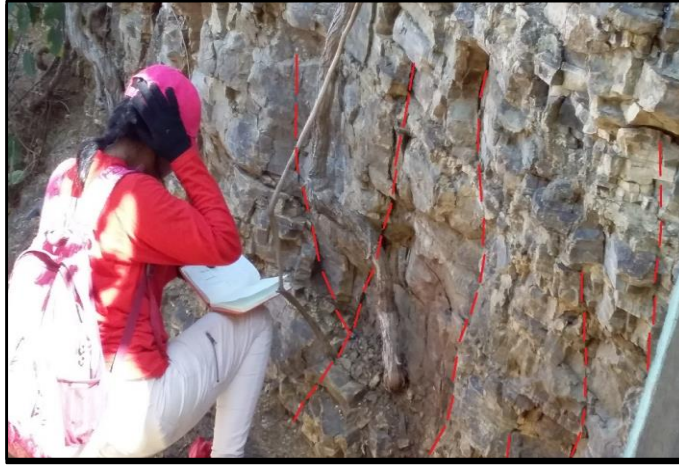


Foto 4.19. Unidad de Lutitas deformada por fracturas curvilíneas

En La Punta la Barranca se observan sistemas de fracturas conjugadas (Foto 4.20.A) donde el ángulo indica un movimiento lateral hacia el noreste, además se hace notoria una estructura de tipo stepovers o sigmoides (Foto 4.20.B) las cuales se forman en zonas de cizalla dextrales o sinestrales.

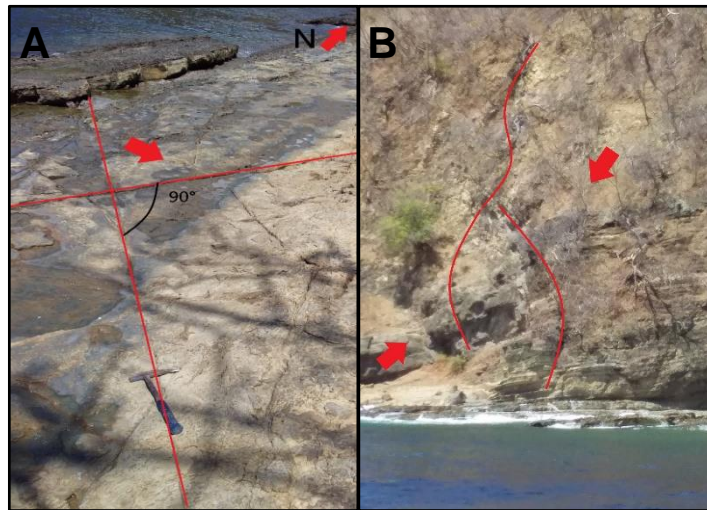


Foto 4.20. Unidad de Areniscas Fosilíferas, Lutitas Y Calizas

Se muestra en la Foto A) sistemas de fracturas conjugadas, Foto B) Stepovers o sigmoides.

La falla El Faro se encuentra segmentada debido a que recorre parte de la costa de San Juan del Sur lo que hace que no sea visible, es una falla con un movimiento lateral izquierdo el cual desplaza a la falla La Loma, este movimiento es visible en el barrio Pedro Joaquín Chamorro.

Falla La Costa y Falla San Juan

La falla La Costa y la falla San Juan forman parte de la fase de fallamiento noroeste, estas dos estructuras se encuentran segmentadas y debido a la cercanía de ambas fue difícil la identificación de estructuras relacionadas con ellas, se visitó la zona sur del barrio Camilo Ortega, el área de San Rafael del Valle, el barrio Pedro Joaquín Chamorro, Zacarías Mora y Playa el Remansp para la caracterización de indicadores cinemáticos que nos dieran indicios del movimiento de estas.

En los afloramientos del barrio Camilo Ortega y San Rafael del Valle se pudo observar que estos presentan un alto grado de fracturamiento lo cual no define una dirección precisa de las estructuras, esto es debido a que en el área se generó un sistema de fallamiento conjugado en el que se involucran las fallas San Juan, La Costa y falla El Faro. Sin embargo, en los barrios Zacarías Mora y Pedro Joaquín Chamorro se hace evidente la existencia de estas estructuras.

La falla La Costa tiene una dirección N82°O, esta se encuentra segmentada ya que es notable en el barrio Camilo Ortega con una longitud de 900 metros, desapareciendo en el área costera de la ciudad y reapareciendo en el sector de La Talanguera con una longitud observable de 2 km.

En el barrio Zacarías Mora es notable la presencia de esta falla ya que se observan fracturas paralelas (Foto 4.21.A) con dirección preferencial de N60°O, ahí mismo en la carretera principal de San Juan del Sur se observan fracturas curvilíneas con orientación hacia el noroeste (Foto 4.21.C) y con apertura de 3 centímetros (Foto 4.21.B), esta área está totalmente deformada por esfuerzos actuantes en la zona, donde se observan fracturas con leves desplazamientos lo cual nos indica que esta falla es de tipo inversa.

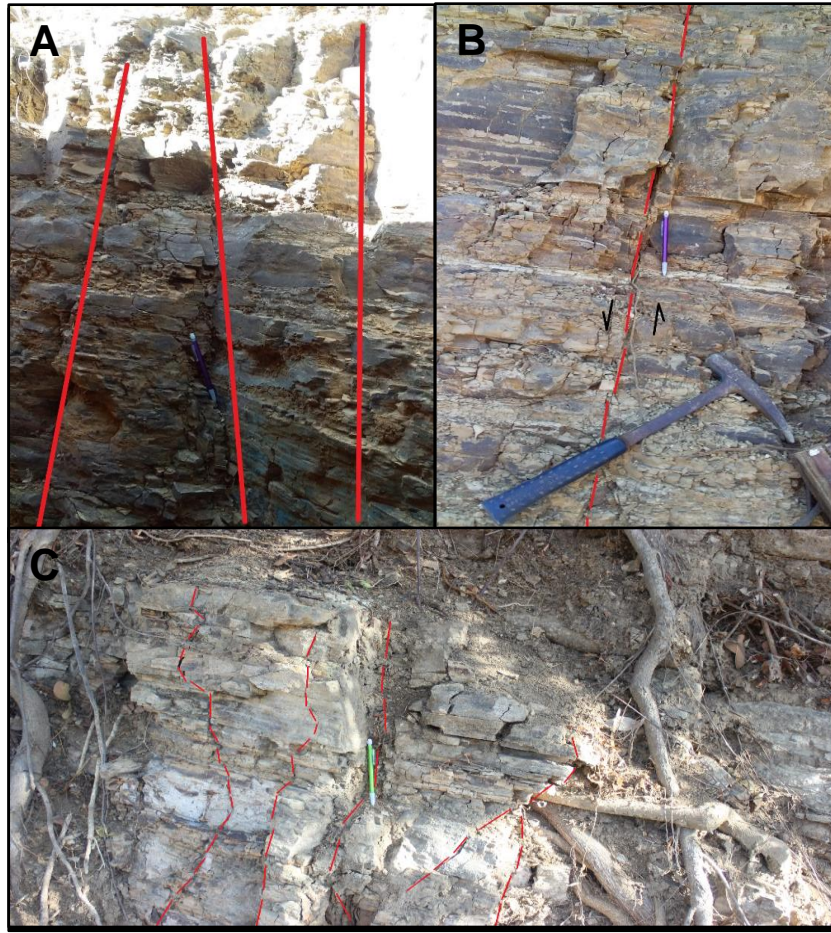


Foto 4.21. Afloramientos de Lutitas

Se observa en la foto A) Fracturas paralelas, Foto B) se observa una fractura de modo 3, Foto C) fracturas curvilíneas, estas estructuras son fracturas secundarias de la falla La Costa.

La Falla San Juan es una falla con dirección N75°O, la cual va desde el norte de la playa El Remanso hasta la comunidad de El Papayal, abarca una longitud aproximada de 12.7 kilómetros siendo la falla más extensa dentro del territorio.

Aflora al norte de la Playa el Remanso afectando la unidad de areniscas, se puede observar estructuras Riedel con una dirección preferencial de N70°O. En la zona central de San Juan del Sur se hace indudable, ya que interviene en el comportamiento del río San Juan ocasionando un cambio brusco en la dirección de la corriente. En el barrio Las Pampas se obtuvieron datos tales como fracturas con dirección preferencial N73°O lo que se interpretó como estructuras relacionadas con esta falla, el carbonato de calcio se hace presente rellenando fracturas (Foto 4.22), en el sector norte la variación en la topografía y la coincidencia en la dirección del

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

lineamiento identificado con la falla observada en la zona sur y demás afloramientos visitados la hacen indudable, tratándose de una falla con movimiento lateral derecho.

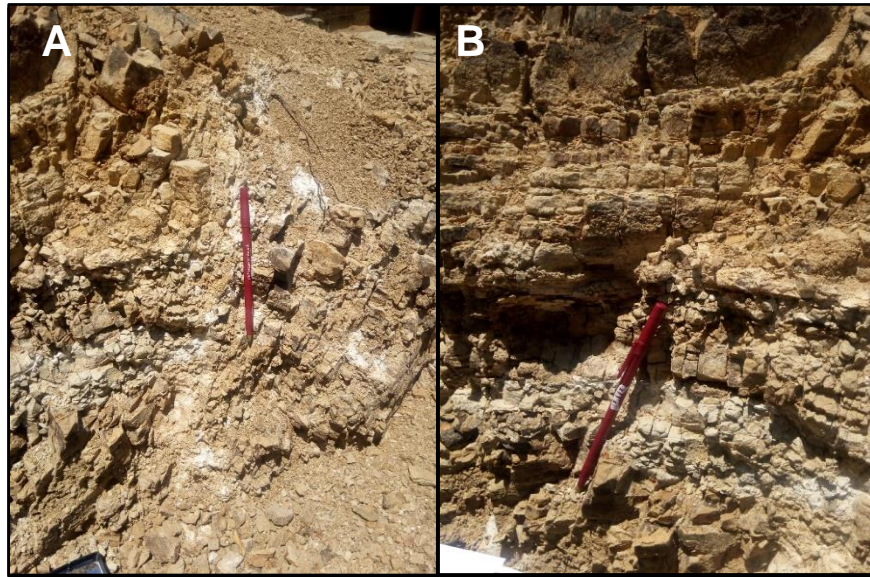


Foto 4.22. Carbonato de calcio relleno de fracturas, unida de Lutitas.

En los alrededores de Villas de Palermo se observó una fractura con terminación en abanico (Foto 4.23) afectando la unidad de Lutitas, esta estructura está relacionada con movimientos transcurrentes, esta estructura sumado al estado de la roca ha provocado un movimiento en el terreno.



Foto 4.23. Unidad de Lutitas, Falla San Juan

Se observa una estructura con terminación en abanico.

Falla El Remanso

Esta es una falla identificada por el INETER y representada en el mapa de fallas de Nicaragua, representa una longitud total de 6,4 metros y va desde playa El Remanso hasta La Lagunita, tiene una dirección de N51°E y afecta las unidades de Lutitas y Areniscas. Se visitó la playa El Remanso para conocer la cinemática de esta falla, encontrando indicadores tales como fracturas con terminación en abanico relacionadas con fallas transcurrentes (Foto 4.24.A), también se observó sistemas anastomazados (Foto 4.24.B), con dirección preferencial de N20°E.

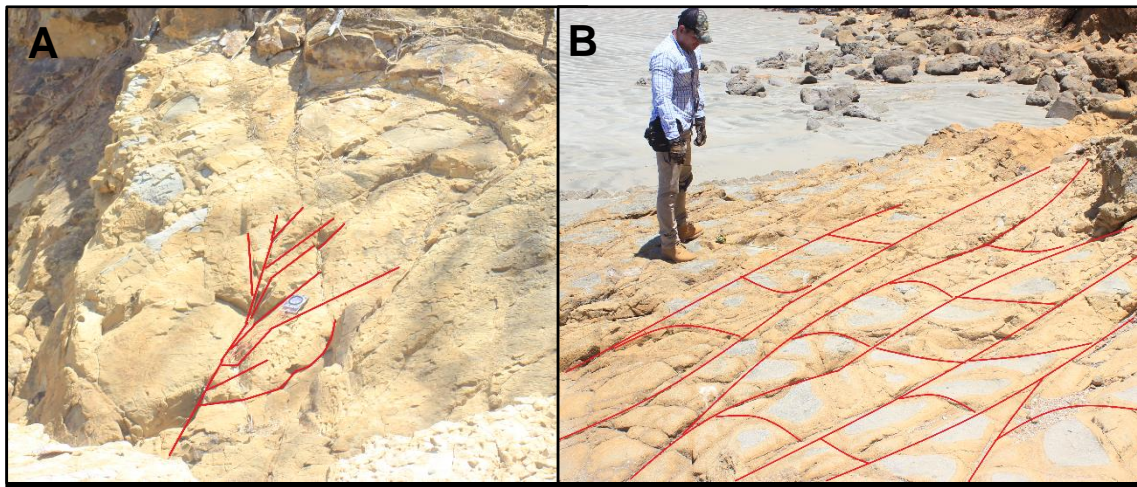


Foto 4.24. Unidad de Calizas, Falla El Remanso

Se observa en la Foto A) fracturas con terminación en abanico, Foto B) sistema anastomazado, indicando el movimiento lateral de la falla San Juan.

Al norte de la Playa el remanso se observó un afloramiento totalmente deformado donde se pudo caracterizar un stepovers o sigmoide (Foto 4.25), este nos indica lateral de la estructura, también hay presencia de harina de falla lo que facilita la identificación de la cinemática comprobando que se trata de una falla con movimiento sinistral.

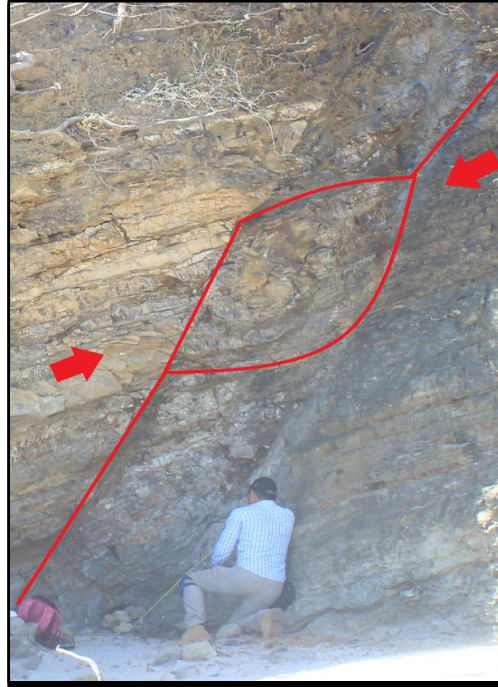


Foto 4.25. Estructura Stepovers afectando la Unidad Lutitas, Falla El Remanso

Falla La Loma

En la etapa de foto interpretación se delimitó un lineamiento con dirección N65°O, que forma parte del mirador Cristo de la Misericordia, siendo imperceptible dentro de la ciudad y apareciendo nuevamente en las coordenadas E 623118 - N 1244747 pero con una dirección N45°O, lo cual indica que esta falla fue desplazada por la falla El Faro esta realizó un movimiento lateral Izquierdo ocasionando la discontinuidad de la falla La Loma.

Esta falla es la más antigua de todas las identificadas y forma parte de la primera fase de fallamiento, es una falla donde la erosión ha actuado de manera eminente, ya que en varios sectores de menor resistencia ya no es posible percibirla. Esta falla se encuentra segmentada observándose en el mirador de San Juan del Sur, dentro de la ciudad ya no es posible identificarla, pero reaparece exactamente en el empalme de Ostional.

Se visitó el barrio Las Pampas, aquí las condiciones del sitio muestran un fracturamiento extremo, debido a esto la roca ha cedido fácilmente a la

meteorización y los afloramientos visitados no prestan las condiciones para indicarnos qué tipo de cinemática pertenece a esta falla.

Falla El Centro

Posee una dirección N26°E y abarca una longitud de 7.5 kilómetros, va desde la playa Peñas Rotas hasta la Finca Las Nubes, afecta las unidades de areniscas, calizas y lutitas, pertenece a la fase de fallamiento noreste las cuales son las fallas más recientes en el área. Para esta falla no se encontró ningún afloramiento bien expuesto en donde existiera la amenaza ante movimientos de terreno por lo que no se pudo caracterizar indicadores cinemáticos.

Falla Las Nubes

Para esta falla no se visitó ningún sitio, pero en la etapa de fotointerpretación y con la ayuda de los mapas altimétrico y modelo de sombras se observó un lineamiento con dirección N-S y una longitud de 5 kilómetros que afecta desde el oeste del Carrizal hasta la Finca las Nubes.

4.1.2.2 Resultados de análisis estructural de San Juan del Sur

El ambiente estructural de San Juan del Sur es producto de la interacción de la placa de Cocos y la placa Caribe cuyo fenómeno de subducción provoca esfuerzos compresivos que en algunos casos sobre pasan la resistencia de las rocas y producen deformación permanente dando lugar a la formación de estructuras geológicas en el área. Estas estructuras se clasificaron en fases de fallamiento de actividad tectónica y se catalogaron de acuerdo al movimiento de desplazamiento relativo entre ellas.

En la Roseta de fracturas (Figura 4.10) se pueden observar que el eje principal de deformación se da en dirección N40°O el cual es más o menos coincidente con el ángulo de subducción entre la placa de Cocos y la placa Caribe, en el diagrama se muestra una dirección preferencial de fracturas NE-SO y NO-SE y N-S lo cual es coincidente con nuestras fases de fallamiento encontrado para esta zona en la cual es sistema de fallas Noroeste es el más antiguo, seguido de las fallas en dirección Norte-Sur, siendo las más jóvenes las fallas con dirección Noreste (Figura 4.11).

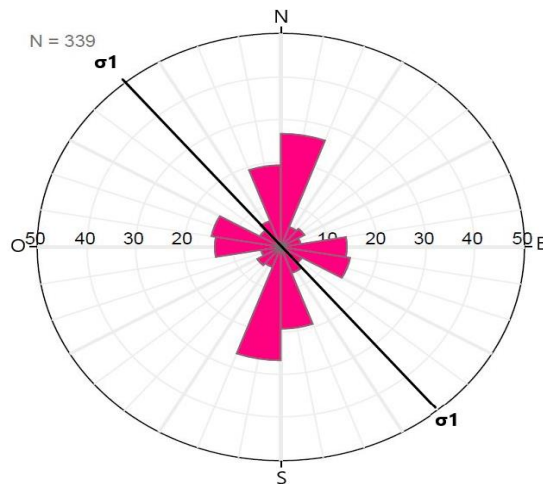


Figura 4.10. Diagrama de Rosas general de la Ciudad de San Juan del Sur

Mapa Estructural de la ciudad de San Juan del Sur

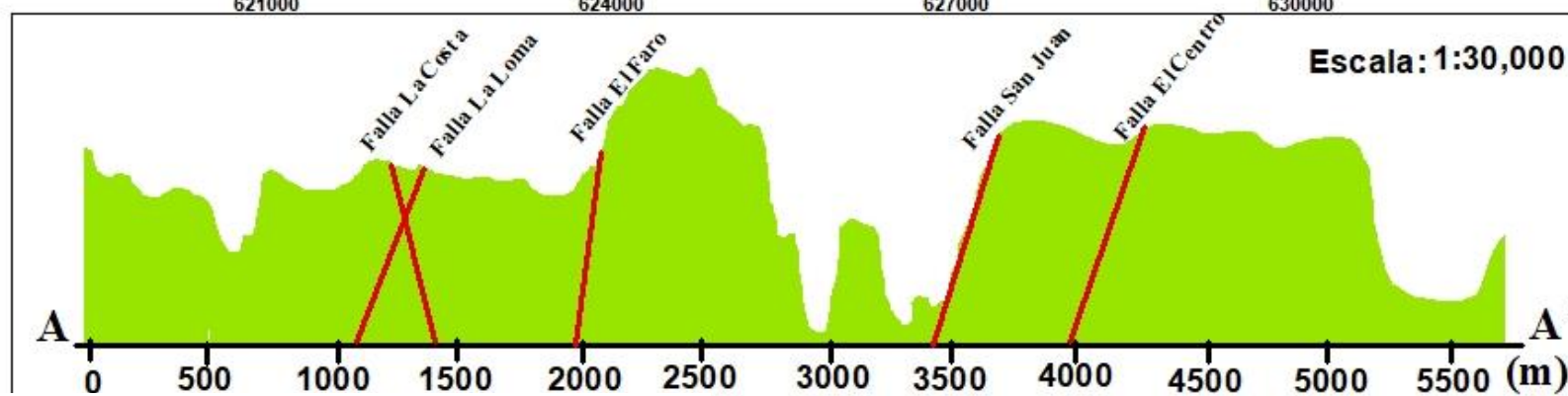
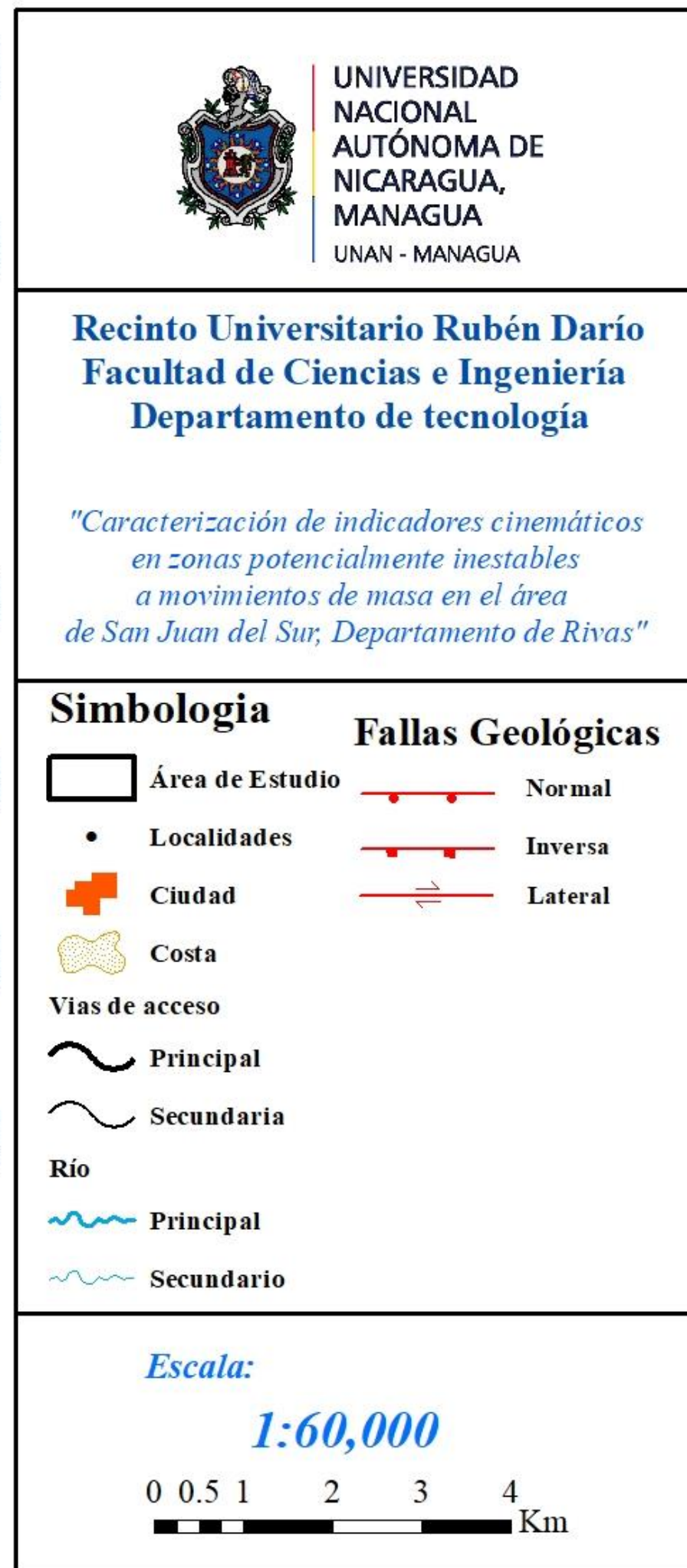
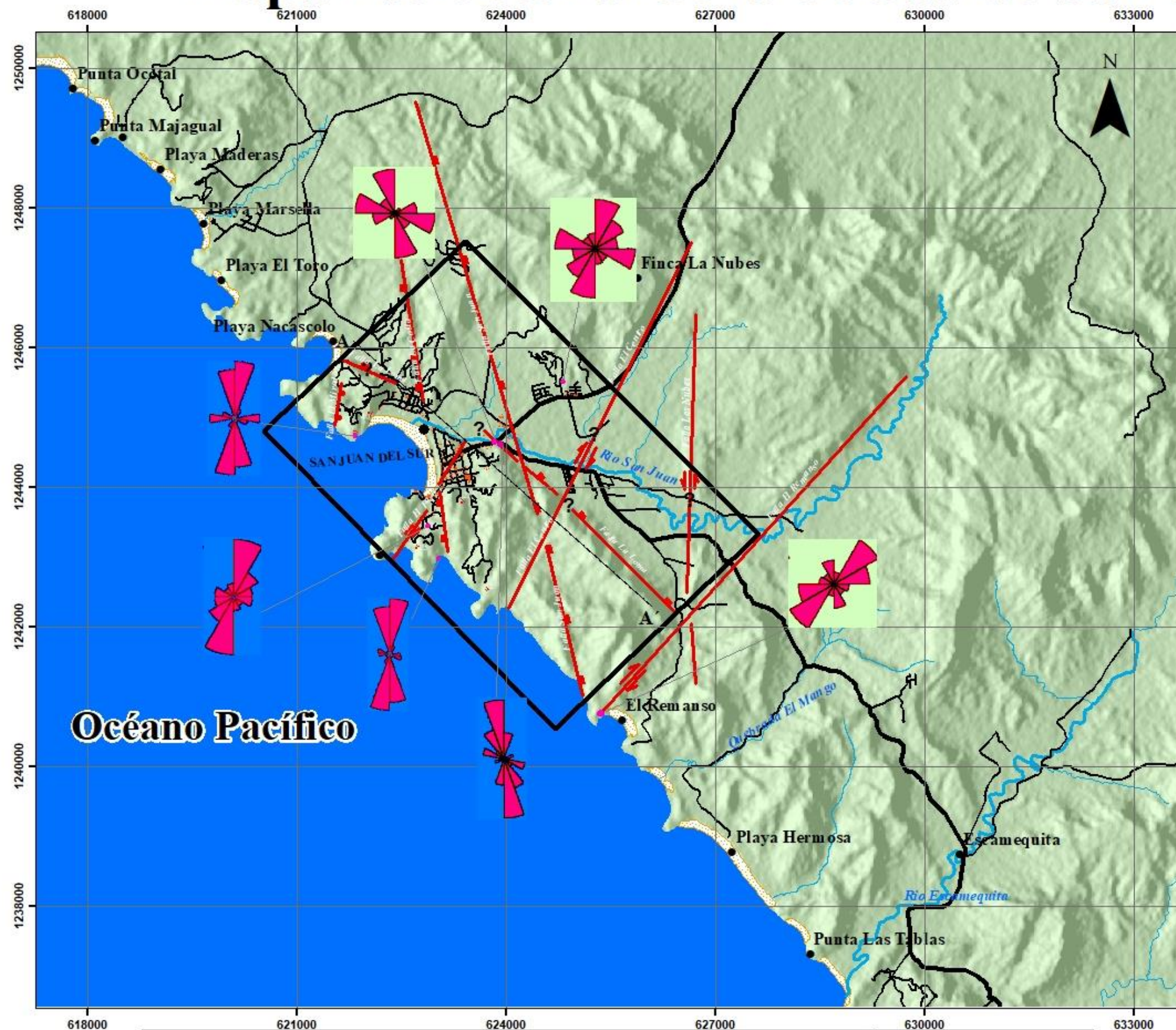


Figura 4.11. Mapa Estructural de San Juan del Sur

4.1.3 Procesos de movimientos de masa en San Juan del Sur

En San Juan del Sur constituyen un conjunto de características para el desarrollo de la inestabilidad de Ladera, tales como; actividad sísmica, huracanes, inundaciones, actividad antrópica entre otros, estos factores son muy importantes al momento de contribuir a lo que es el desplazamiento de masa.

SINAPRED (2005) menciona en su reporte de vulnerabilidad y Riesgo de San Juan del Sur la amenaza por inestabilidad de ladera; aplicando el análisis de susceptibilidad esto indica zonas con niveles de riesgo medio y alto dentro de este municipio, en este estudio analizaron varios puntos dentro del casco urbano obteniendo como resultado la existencia de procesos de inestabilidad, además de numerosas texturas de reptación, estos procesos se deben al espesor de los suelos desarrollados y a las altas pendientes que configuran el paisaje.

La fisiografía de la región, configurada por serranías alineadas, con estructuras tipo homoclinal, con crestas agudas y pendientes suaves en los flancos que miran al pacífico, además de altas pendientes en los faldeos frontales hacen la zona propensa a deslizamientos. Las rocas sedimentarias con estratos inclinados en el sentido de las estructuras indica un potencial de deslizamientos traslacional, además de que el tipo de roca constituidas principalmente por calizas, lutitas y areniscas, muestran muchos niveles limo-arcillosos que pueden servir como nivel de patinaje para la producción de deslizamientos a esto se suma la amplia profusión de suelos formados sobre ese sustrato sedimentario y que muestra importantes espesores en su desarrollo.

Estos deslizamientos peliculares se los tipifica como subestabilizados a lentos y de naturaleza superficial, y muestran en su desarrollo afectación por procesos de reptación. El nivel de amenaza otorgado por INETER (2001) indica un grado 3 de amenaza para el municipio en una escala de 1 a 10. Esa cuantificación se basa en la elevación con respecto al nivel del mar, datos históricos y datos posteriores al huracán Mitch.

Se evaluaron los barrios Pedro Joaquín Chamorro, Zacarias Mora, Las Pampas y Camilo Ortega además del mirador Cristo de la Misericordia, en los cuales los

problemas por movimientos de masa han sido una afectación constante para los pobladores, en estos barrios se tomaron criterios tales pendientes de la ladera, altura, tipo de roca, y las condiciones en cuanto a meteorización, alteración y fracturamiento de esta.

Tomando en cuenta la afectación en los pobladores, la observación directa de campo y una serie de tipología de indicadores por su naturaleza: geomorfología, geología, hidrogeología, indicadores estructurales, vegetales, toponimia e indicadores históricos, se elaboró un mapa de inventario de movimientos de masa (Figura 4.12), para esto también se hizo uso de mapas de modelos de sombras, altimétricos, de pendientes, topográficos, imágenes satelitales y fotografías aéreas. Para este mapa se utilizó la metodología empleada por INETER-COSUDE, 2005 donde clasifican la inestabilidad de ladera según Varnes.

Mapa de inventario sobre movimientos de masa, Ciudad de San Juan del Sur



Figura 4.12. Mapa de Inventario sobre movimientos de masa.

Camilo Ortega Saavedra

Para analizar y comprender los movimientos de masa en este barrio se visitaron sitios donde ha habido antecedentes de este fenómeno, tomando en cuenta la observación directa de indicadores cinemáticos relacionados a estos eventos.

El barrio posee con una topografía accidentada por lo cual las zonas altas con vista al mar llaman la atención de turistas para edificar mansiones, ocasionando de manera directa sobrecargas a la ladera, está por sí sola no presenta condiciones para el desarrollo poblacional y mucho menos para construcciones de estas magnitudes

Además, el barrio en su totalidad muestra la problemática de qué las condiciones físico-química (mecánica) de la roca sumado a los cambios en la geometría original de la ladera presenta un escenario idóneo para eventos de remoción en masa.

En las coordenadas E 623110-N 1243905 (Foto 4.26), las viviendas están construidas en lomas de hasta 70 metros de altura, en este sitio se pudo observar que la mala distribución de las casas dificulta las vías de acceso por lo cual se transita por trochas. Al momento de construir no se toma en cuenta el estado de la roca ni la topografía ya que los habitantes modifican la ladera para poder asentar sus casas, en consecuencia, de estas acciones el suelo tiende a caer afectando las viviendas y poniendo en peligro a las personas.

La primera vivienda visitada deja ver un estado crítico de la roca ya que presenta un alto grado de fracturamiento y una avanzada meteorización esferoidal lo que ocasiona constante desprendimiento de material, también se puede observar que, en la parte superior del afloramiento, la composición rocosa cambia ya que esta se encuentra en un estado totalmente degradado lo que hace el sitio más propenso a movimientos de masa, esta ladera tiene una altura de 3 metros y una pendiente promedio de 70°.

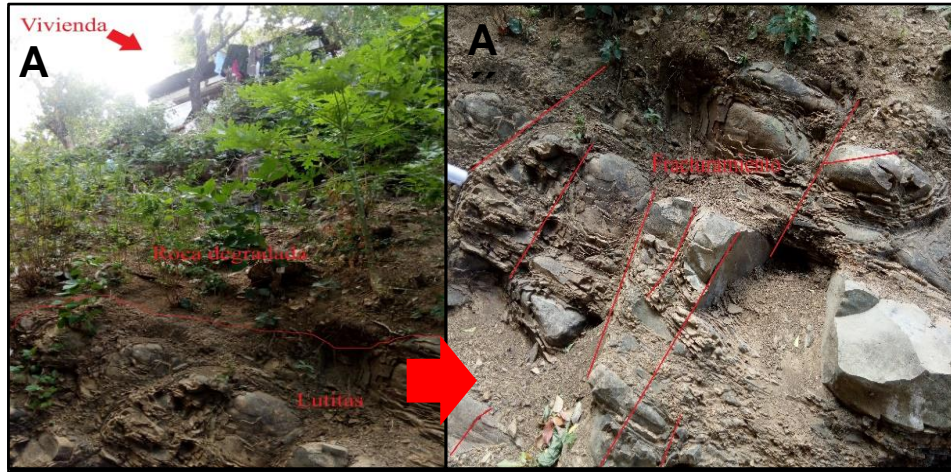


Foto 4.26. Vivienda ubicada sobre rocas de tipo Lutitas totalmente meteorizadas y fracturadas.

Al sur del barrio en las coordenadas E 622990 N 1243599 (Foto 4.27), se observó una ladera compuesta por roca caliza de 7.4 metros y 80 grados de inclinación con un alto grado de fracturamiento el cual ocasiona que se infiltre el agua saturando la roca y ocasionando la degradación acelerada de esta. Estas fracturas se formaron por esfuerzos compresivos los cuales deformaron totalmente el lecho rocoso, esto sumado a las acciones antropogénicas negativas y eventos naturales propios del sitio hacen propenso el lugar a eventos de remoción en masa. Como consecuencia de estos procesos la roca tiende a desprenderse en bloques de tamaños considerables, también se puede observar caída de detritos y rocas. Al visitar el sitio se comprobó que la principal problemática es el mal uso del terreno para poder realizar construcciones de viviendas, ya que cambian la pendiente de laderas dejándolas prácticamente verticales.



Foto 4.27. Desprendimiento de Rocas y bloques, Unidad de Calizas

En la Foto A) se observa el estado de fracturamiento de la roca, Foto B) muestra la vivienda afectada por la ladera.

En las coordenadas E 623014-N 1243558 las viviendas están a 3 metros de una ladera de 6.1 metros de altura y una pendiente de 75 grados (Foto 4.28) en la cual se hace notoria la meteorización esferoidal de la roca de tipo lutita, esto provoca constante desprendimiento de material, también se observa un alto grado de fracturamiento. En la parte superior de la ladera se observa una construcción masiva la cual proporciona sobrecargas a esta lo que puede ser un factor considerable al momento de evaluar la inestabilidad del sitio.

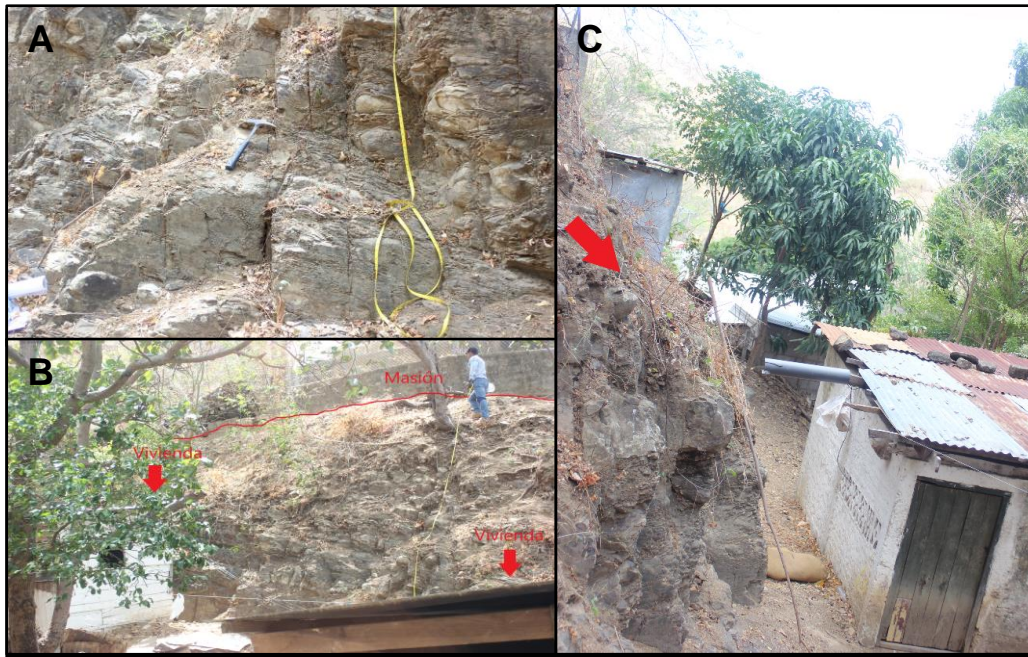


Foto 4.28. Inestabilidad en el barrio Camilo ortega, unidad Lutita

Se observa un área bastante inestable, Foto A) fracturamiento y meteorización en la roca, Foto B) viviendas afectadas y sobrecarga en la parte superior de la ladera, Foto C) dirección de caída de material en una pendiente de 75°

El barrio Camilo Ortega presenta la incidencia de fallas cercanas como La Loma, El Faro, La Costa y San Juan, asociado a estas afectan un sin número de fracturas las cuales sumadas a otros factores como el estado de las rocas sedimentarias ricas en minerales ferromagnesianos propensas a una rápida oxidación y alteración, la meteorización y estratificación de esta y la intervención del hombre hacen vulnerable el sitio para que factores antropogénicos, sísmicos y meteorológicos desencadenan movimientos de masa.

Barrio Zacarías Mora

En este barrio se visitaron dos puntos críticos debido a que las condiciones del sitio son las mismas, en las coordenadas E 623677- N1244501 se observa una vivienda ubicada al pie de una ladera de 3 metros con una inclinación de 85 grados con respecto a la horizontal (Foto 4.29), en este punto es notoria la tendencia de la roca a caer, esto es posible debido a que es un suelo oxidado y meteorizado, en donde el agua entra por las fracturas ocasionando aperturas de hasta 5 centímetros en ellas.



Foto 4.29. Inestabilidad del terreno en el Barrio Zacarías Mora

Foto A) se muestra la alta meteorización de la roca, Foto B) vivienda afectada.

El alto contenido de óxido en la roca hace posible un alto grado de meteorización en donde se está convirtiendo en suelo rápidamente, las fracturas observadas alcanzan aperturas de hasta 4 centímetros (Foto 4.30) lo que causa preocupación debido a que la vivienda está ubicada a 50 centímetros de la ladera la cual tiene una pendiente de 90 grados con respecto a la horizontal y en cualquier momento bajo la intervención de factores tanto sísmicos o meteorológicos esta podría caer afectando a los habitantes. Los prendimientos comunes en el sitio son por caída de detritos sin embargo en el área es probable que se originen una caída masiva de material ya que las fracturas dan indicios de la posibilidad de ocurrencia de esto.

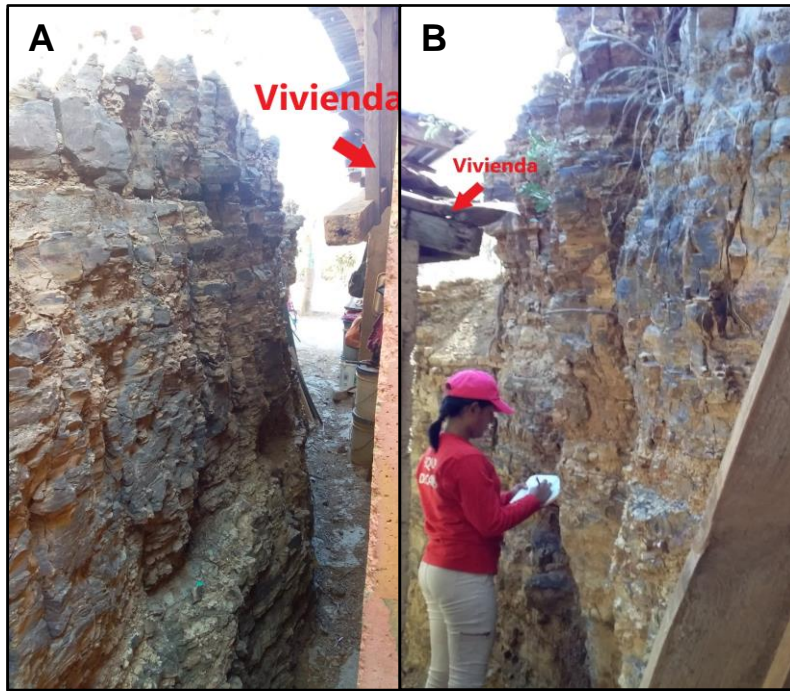


Foto 4.30. Unidad Lutita afectada por fracturas con apertura de hasta 4 cm.

Otro factor que hace posible la inestabilidad del sitio además de las condiciones de la roca y el grado de fracturamiento, es la actividad humana ya que para llevar a cabo la construcción de dicha vivienda se removió material dejando la ladera expuesta lo cual es idóneo para que se den movimientos de suelo.

Cabe mencionar que la mayoría de los habitantes tienen esta problemática ya que el barrio está ubicado en una loma donde se han realizado construcciones de casas y caminos sin tomar en cuenta las condiciones del terreno.

También se visitó las coordenadas E623843 N1244614 donde se observó una ladera de 3 metros de roca Lutita totalmente meteorizada con una inclinación de 88 grados con respecto a la horizontal, aquí el grado de fracturamiento es alto y la estratificación tenue lo que ocasiona que la roca se fragmente en detritos los cuales caen constantemente sobre la vivienda.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

En la fotografía 4.31 se puede observar que la caída de detritos a cubierto casi toda la parte trasera de una vivienda de 3 metros, también se observa que la meteorización esferoidal contribuye al desprendimiento de material.



Foto 4.31. Caída de detritos en el Barrio Zacarías Mora.

Aquí se identificaron fracturas con leve desplazamiento (Foto 4.32), lo que indica que el área es sísmicamente activa y las condiciones del sitio pueden empeorar cuando se den este tipo de eventos geológicos, además se pudo observar que el desprendimiento es constante y el riesgo alto para la familia.



Foto 4.32. Fracturas con desplazamiento en el Barrio Zacarías Mora.

Este barrio es directamente afectado por la falla El Faro, por lo cual las condiciones del sitio no son las más óptimas para el asentamiento poblacional por esto mismo, el área se comporta de una manera vulnerable ante eventos de remoción en masa debido a que el alto grado de fracturamiento presta las condiciones para que la roca sedimentaria característica del sitio en este caso Lutitas, sea propensa a una rápida meteorización debido a que el agua recorre fracturas debilitando el material rocoso,

además a esto se suma la presencia de estas estructuras más la estratificación del sitio que ayudan a que la roca se desprenda más rápido.

Área del mirador Cristo de la Misericordia

El sitio a simple vista muestra un escenario de caída de bloques, detritos y rocas (Foto 4.33), las unidades de rocas presentes en el área son calizas, areniscas calcáreas y lutitas, las cuales son afectadas por un sin número de fracturas en todas direcciones. La poca resistencia de estas rocas ante la meteorización y la sobrecarga ocasionada por mansiones, residencias construidas en la parte superior de la ladera, actividad sísmica entre otros provocan estos derrumbes.



Foto 4.33. Caída de detritos, rocas y bloques en el mirador del Cristo de la Misericordia.

Aquí se han dado antiguos eventos masivos de movimientos en masa, las evidencias de estos están en la parte baja del mirador, junto a la costa se pueden observar bloques de tamaños considerables los cuales se han desprendido del bloque original. En las coordenadas E 622000 - N1244846 se puede observar un movimiento de masa de caída de detritos (Foto 4.34) este se encuentra relacionado con la falla El Mirador y estructuras geológicas secundarias.



Foto 4.34. Caída de detritos, mirador del Cristo de la Misericordia.

El plegamiento ocurrido en el área ha contribuido a que la roca altamente meteorizada tenga más posibilidades de caer ya que al aplicar esfuerzos compresivos la roca se fracturó en el proceso, posteriormente agentes tales como la lluvia, sismos, huracanes y la misma actividad humana desencadenen los eventos de remoción en masa que se pueden observar hoy en día. Se puede decir que es un sitio altamente probable ante ocurrencia de movimientos de terreno, catalogándolo como uno de los puntos más inestables en toda la ciudad.

Los movimientos de masa característicos del sitio son caídas de detritos, rocas y desprendimientos de grandes bloques (Foto 4.35), estos últimos prevén un evento importante de deslizamiento próximamente, debido a que grandes fracturas dividen enormes bloques del macizo rocoso, los cuales caerán poco a poco, por acción natural o por la intervención de factores, geológicos, meteorológicos o antrópicos.

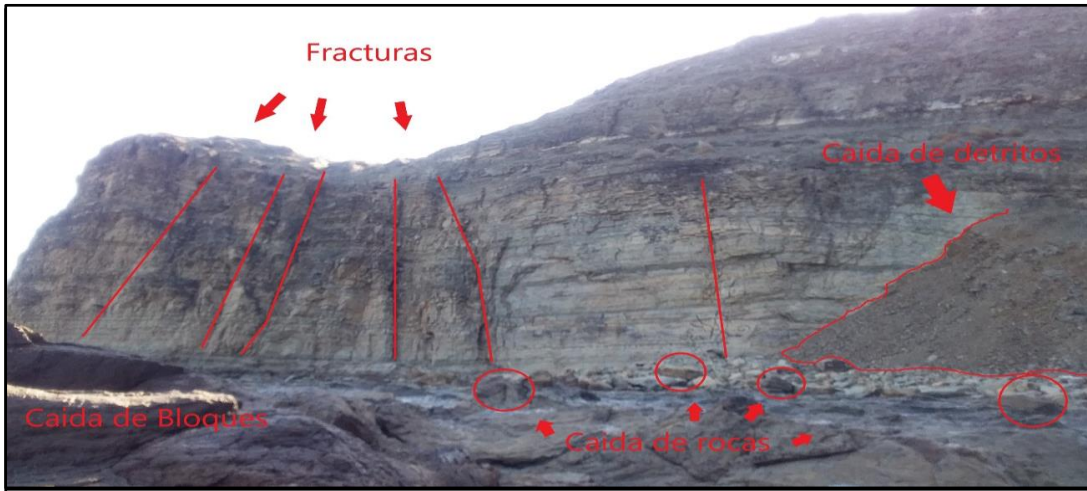


Foto 4.35. Alto grado de fracturamiento ocasionando movimientos de masa.

Barrio Las Pampas

Este barrio se encuentra ubicado junto al empalme de Ostional y se ubica en las faldas de una ladera de 72 metros de altura, en las coordenadas E623947 N124461, la geometría original de esta ha sido modificada para la construcción de las viviendas, dejando como resultado una pared expuesta de 8 metros de altura, aquí aflora la unidad Lutita la cual presenta un alto grado de alteración producto de minerales ferromagnesianos en la roca y presencia de carbonato de calcio, es afectada por fracturas paralelas y conjugadas algunas de ellas rellenas con carbonato de calcio, este también se encuentra alterando toda la unidad en forma de parches (Foto 4.36).



Foto 4.36. Inestabilidad del terreno en el barrio Las Pampas.

En la Foto A) se muestra el material desprendido el cual es caída de detritos, Foto B) se observa el alto grado de fracturamiento y alteración de la roca.

El área expuesta de la ladera tiene una inclinación de 82 grados con respecto a la horizontal (Foto 4.37) y se observa una constante caída de detritos por lo cual los habitantes han construido muros de retención improvisados, también se observó una residencia de gran tamaño construida en la parte superior de la ladera la cual proporciona sobre cargas en esta.



Foto 4.37. Ladera afectando viviendas en el barrio Las Pampas.

En este sitio las condiciones físicas, químicas y mecánicas de la roca, el grado de fracturamiento, la actividad antrópica y eventos naturales han provocado que el sitio sea inestable por lo cual el material tiende a caer con mayor facilidad.

Barrio Pedro Joaquín Chamorro

Al visitar este sitio el principal llamativo fue la ubicación de las viviendas al pie de una ladera con 88 grados de inclinación con respecto a la horizontal, esta ladera tiene una altura total de 33 metros y una pared de roca expuesta de 8 metros de altura, aflora la unidad de Lutitas y es notoria la presencia de material aluvial en la parte superior. En las coordenadas E 623137 - N 1244789, la roca se encuentra altamente meteorizada y presenta un alto grado de fracturamiento paralelo (Foto 4.38.A), por el cual el agua se infiltra descomponiendo la roca y saturándola, algunas de estas tienen un ancho de 10 centímetros en las cuales el material esta sostenido solamente por raíces de árboles por lo cual en cualquier momento puede caer (Foto 4.38.B).

También la estratificación de las rocas juega un papel importante en la caída de material, las fracturas paralelas y la estratificación subhorizontal cuarteán la roca propiciando así caída de estas en tamaño de hasta 10x12 centímetros.

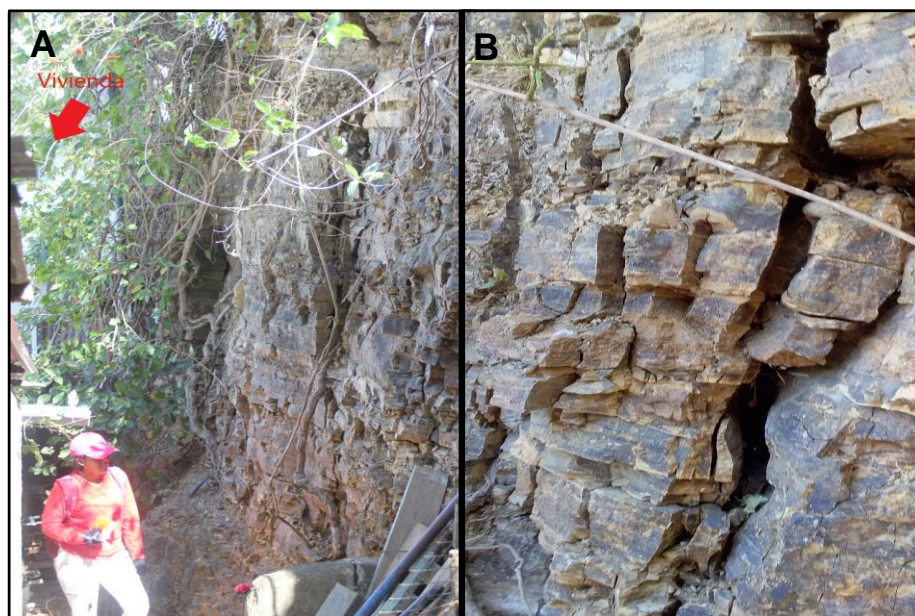


Foto 4.38. Inestabilidad del barrio Pedro Joaquín Chamorro.

Se puede catalogar este sitio como un punto con un nivel de amenaza alto, donde inciden tanto las condiciones de la roca, el alto grado de fracturamiento y la actividad antrópica por lo cual este sitio es propenso a movimientos de masa importantes.




4.1.4 Análisis geotécnico para los barrios Las Pampas y Pedro Joaquín Chamorro

Propiedades Geotécnicas de Laboratorio

A partir de los parámetros Físicos - mecánicos de los materiales obtenidos en campo y en los ensayos realizados en el laboratorio, se han caracterizado desde el punto de vista geotécnico los suelos y rocas que conforman Las Pampas y el Barrio Pedro Joaquín Chamorro.

Estos tipos de materiales presentan diferentes grados de consolidación y resistencia, se agruparon en dos categorías diferentes estas son: suelos no consolidados correspondiendo a suelos arcillosos y suelos limosos y rocas blandas (rocas alteradas correspondientes a lutitas), esto en el barrio Las Pampas (Tabla 4.1), y los materiales encontrados en el barrio Pedro Joaquín Chamorro solamente corresponde a lutitas (Tabla 4.2).

Tabla 4.1. Propiedades físico y mecánicas de los suelos y rocas en las Pampas

Propiedades	CH-MH (Suelo arcilloso- limoso)	CH (Suelo arcilloso)	Lutita(GW)
Color			
Peso Unitario [kN/m ³]	15.8	17.23	21.57
Cohesión [kPa]	2.45	4	40
Angulo de fricción [deg]	0	0	32
Contenido de humedad (%)	25	20	8
Gravedad específica	2.5	2.52	2.6
Porcentaje de absorción	15	18	22

Como se puede apreciar en el barrio Las Pampas se encontraron suelos tipo arcilloso limoso de alta compresibilidad, con coloración oscura, de peso unitario de 15.8 Kn/m³, una cohesión de 2.45 Kn/m² y una fricción de 0. El material arcilloso

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

presenta una coloración rojiza, es altamente compresible, muestra un peso unitario de 17.23 Kn/m^3 y una cohesión de 4 Kn/m^2 . La lutita corresponde a una roca blanda (grava bien graduada), fuertemente agrietada de coloración gris, con porcentaje de absorción alto (30%), de peso específico unitario de 21.57 Kn/m^3 , con una cohesión de 40 Kn/m^2 .

Es importante señalar que en este sitio el nivel de las aguas freáticas se encuentra a 10m de profundidad.

Tabla 4.2. Propiedades físico y mecánicas de los suelos y rocas en El Pedro Joaquín Chamorro

Propiedades	Lutita (GW)
Color	
Peso Unitario [kN/m^3]	21.57
Cohesión [kPa]	40
Angulo de fricción [deg]	32
Contenido de humedad (%)	8
Gravedad específica	2.6
Porcentaje de absorción	22

En el Pedro Joaquín Chamorro, se encontró solamente un material gravoso bien graduado, correspondiendo a una lutita, la cual es una roca blanda, fuertemente agrietada de coloración gris, con porcentaje de absorción alto (30%), de peso específico unitario de 21.57 Kn/m^3 , con una cohesión de 40 Kn/m^2 . El nivel de las aguas freáticas en este sitio se encuentra a 2m de profundidad.

En ambos barrios, los valores de los suelos arcillosos, nos indican que son suelos muy blandos que al ser combinados con agua reducen drásticamente su resistencia y en esta condición saturada son susceptibles a deslizarse y colapsarse.

Estas rocas blandas y fracturadas actúan como base o plano de falla por donde deslizan los materiales localizados por encima e incluso ellos mismos, al infiltrarse el agua en ellos pierden su resistencia y se vuelven susceptibles a deslizamientos y desprendimiento. En estas rocas la saturación de las aguas debido a su agrietamiento por altas precipitaciones y la fuerte actividad sísmica en la zona son las principales causantes de deslizamientos de materiales y colapsos repentinos.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

En la Figura 4.13. se aprecia un caso típico de la distribución en profundidad de los suelos y rocas en el sector de las Pampas. En los primeros 1.5m de profundidad se encuentran suelos arcillosos, por debajo de estos, encontramos un suelo gravoso (roca alterada, lutitas) con grandes espesores.

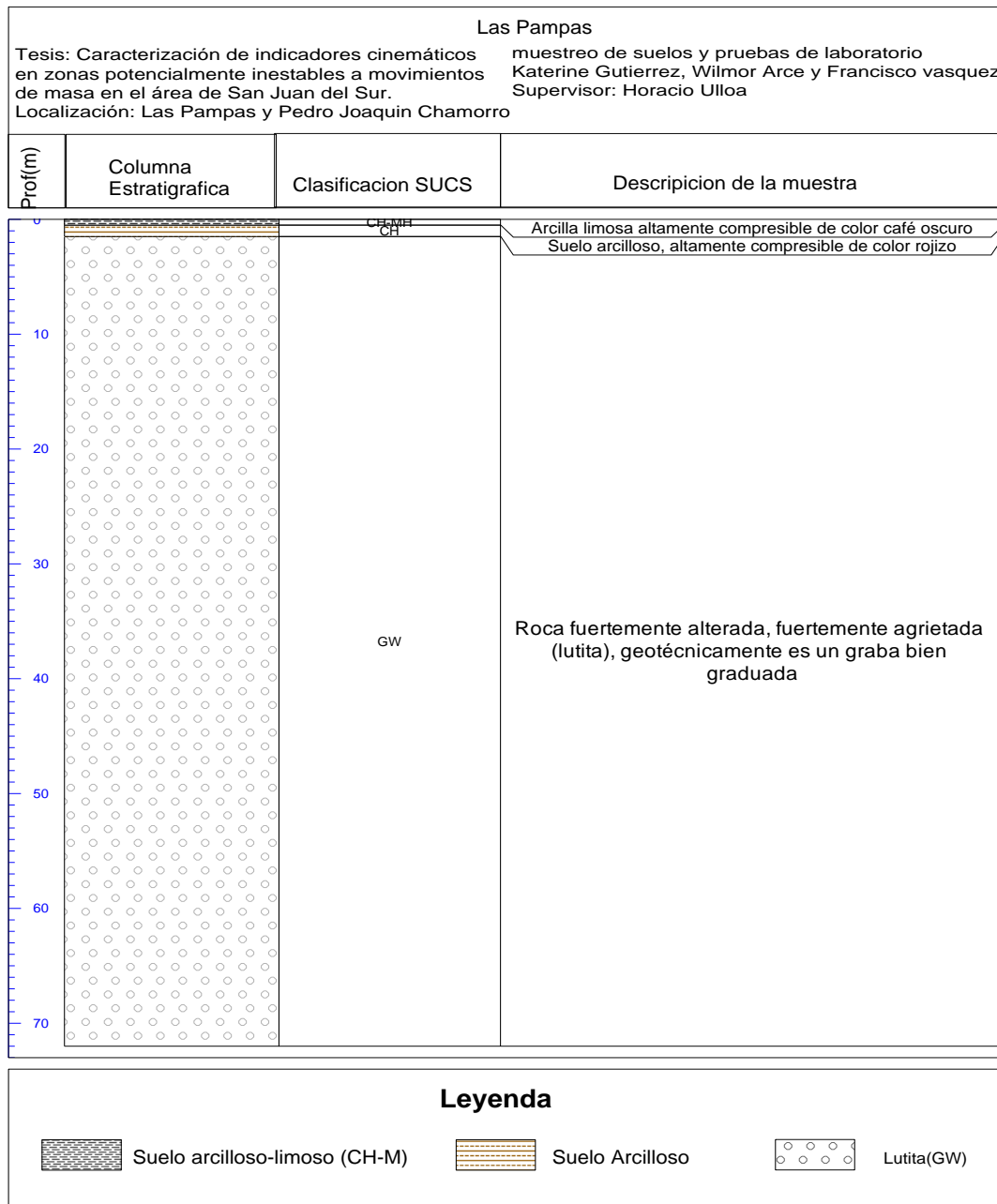


Figura 4.13. Columna de suelos y rocas en el sector de Las Pampas.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

En la Figura 4.14. se aprecia un caso típico de la distribución en profundidad de los suelos y rocas en el sector de El Pedro Joaquín. En los primeros 33m de profundidad se encuentran suelos gravosos (roca alterada, lutitas) fuertemente agrietados.

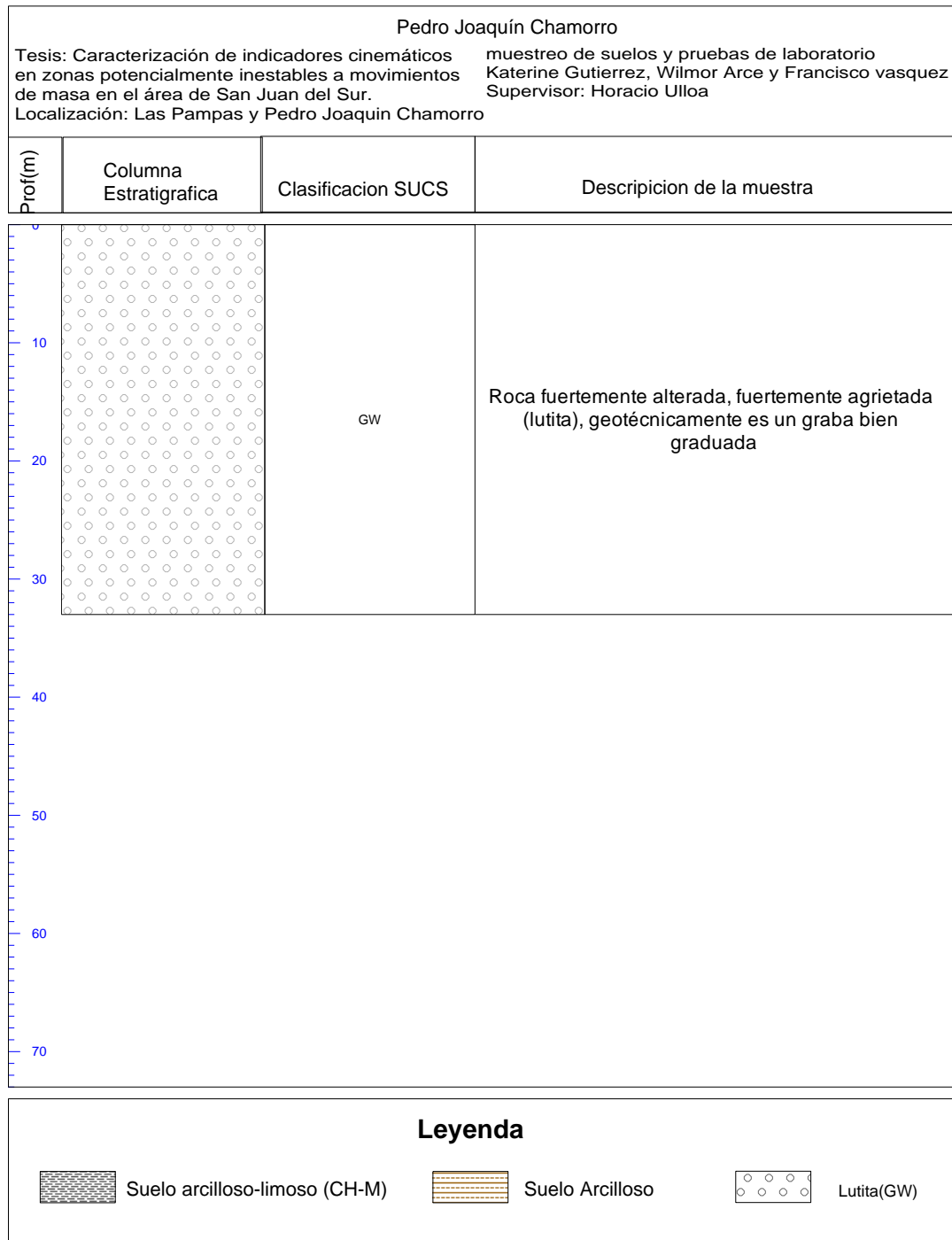


Figura 4.14. Columna de suelos y rocas en el sector de El Pedro Joaquín Chamorro.

Las Pampas

El sitio las Pampas se localiza al Este del casco urbano de San Juan del Sur y se caracteriza por la ocurrencia de deslizamientos de tierras y caídas de material en la ladera (Foto 4.39) debido a la incidencia de altas pendientes, litología, características geo mecánica de los materiales, altas precipitaciones y ocurrencias de fuertes sismos. También las acciones antrópicas que inducen los movimientos en masa incluyen: cortes para la construcción de los caminos y casas en el pie de la ladera, la deforestación y la construcción de grandes edificaciones en la parte superior de la ladera vuelven a este sitio vulnerable a los movimientos de terreno.



Foto 4.39. Casas en el pie de la ladera en el barrio Las Pampas.

Algunos pobladores para contrarrestar la inestabilidad de terreno construyen muros de retención (Foto 4.40). Se puede observar que el muro está construido para evitar caídas de material, no cuenta con mucho refuerzo, también se utilizan llantas para las cuales no juegan ninguna función estructural. Estos sistemas de contención no cumplen con la función de estabilizar debido a la gran cantidad de volumen que podría ser desplazado en un posible evento.



Foto 4.40. Muro de contención en el barrio Las Pampas.

Pedro Joaquín Chamorro

El sitio Pedro Joaquín Chamorro se localiza al Oeste del casco urbano de San Juan del Sur y se caracteriza por la ocurrencia caída de material en la ladera (Foto 4.41.A) debido a la incidencia de altas pendientes, litología (material fuertemente fracturado), características geo mecánica de los materiales (resistencia débil de las lutita en condiciones saturadas), altas precipitaciones y ocurrencias de fuertes sismos provocan caídas de rocas. Además, el nivel de aguas freáticas juega un papel importante en la estabilidad del terreno, en este sitio se ubica a 2m de profundidad (Foto 4.41.B).

Las acciones antrópicas que inducen los movimientos en masa incluyen: cortes para la construcción de casas en el pie de la ladera, la deforestación y la construcción de grandes edificaciones en la parte superior de la ladera vuelven a este sitio vulnerable a los movimientos de terreno.



Foto 4.41. Barrio Pedro Joaquín Chamorro.

Foto A) Ladera ubicada en el Barrio Pedro Joaquín Chamorro, Foto B) Nivel del agua en el Barrio Pedro Joaquín Chamorro.

Según las características geológicas en ambos poblados, el tipo de roca sedimentaria, con estratos inclinados en el sentido de las estructuras, permite indicar una potencial capacidad al deslizamiento traslacional en Las Pampas o desprendimientos de rocas en el caso del Pedro Joaquín Chamorro. Las rocas sedimentarias constituidas por lutitas, calizas y arenisca, muestran niveles limo-arcillosos que pueden servir de nivel de patinaje para la generación de movimientos de terreno (derrumbes de rocas).

A partir de estos análisis se dispuso a determinar la estabilidad del terreno haciendo uso de métodos geotécnicos en estos dos sitios y a continuación se presentan dichos resultados.

Análisis de estabilidad de laderas con métodos geotécnicos

Los movimientos de masa en ambos sitios se producen debido a la saturación de los suelos, las altas pendientes, litología y fracturamiento de los materiales, donde los esfuerzos actuantes debido al peso propio del suelo se incrementan con la humedad y las propiedades de cohesión, fricción disminuyen y con ello hay una reducción de la resistencia al corte, provocando deslizamiento relativo entre los granos del suelo y posteriormente existe movilización de un gran volumen de material.

En el caso de las Pampas, después de la saturación del suelo, el primer movimiento que se produciría en general son deslizamientos traslacionales seguidos de flujos de detritos. En condiciones secas y de sismicidad en el sector también se producen derrumbes de materiales. En el caso del Pedro Joaquín Chamorro se producen derrumbe de materiales y en condiciones de saturación podrían desencadenarse flujos de detritos.

Resultados del análisis de estabilidad en el sector de Las Pampas

Como se mencionó anteriormente, el análisis de estabilidad se usaron 3 métodos, estos fueron: Morgenstern - Price, Spencer y Jambu Modificado. Estos métodos se basan exclusivamente en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable, considerando terrenos inestables con factores de seguridad menores a la unidad.

Luego de ingresar todos los datos al programa, se procedió a realizar el análisis de estabilidad, en los tres métodos empleados se obtuvieron valores de factores de seguridad inferiores 1, donde el factor de seguridad viene a ser la relación que existe entre las fuerzas que resisten (propias de los suelos y rocas) contra las fuerzas que inducen el deslizamiento, debido al peso propio de los suelos y de las rocas, también influyen las sobrecargas y el nivel de aguas freáticas.

El método de Morgenstern - Price y Spencer proporcionaron factores de seguridad de 0.31 (Figura 4.12 y Figura 4.13). El método de Jambu (Figura 4.14) dio valores de 0.32.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

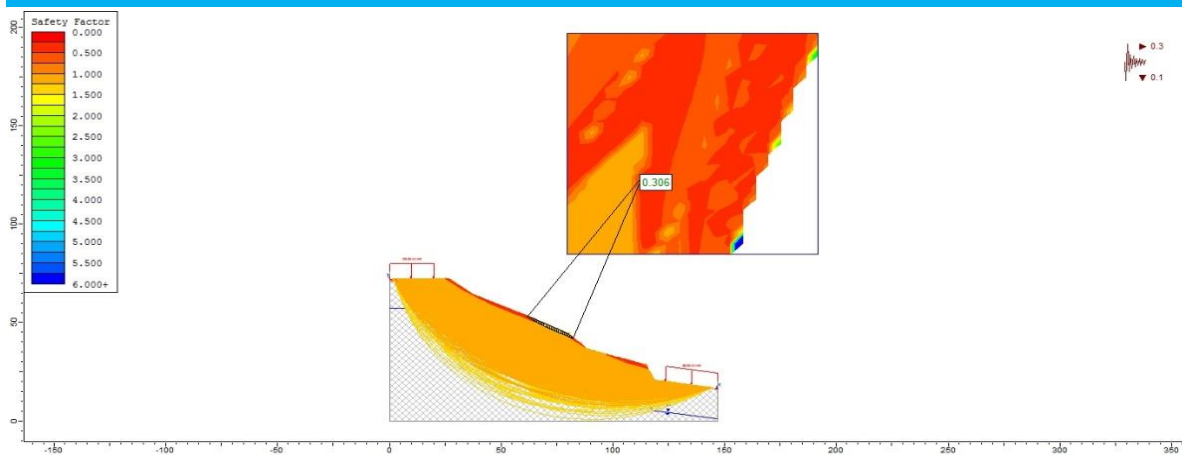


Figura 4.15. Análisis de estabilidad por método de Morgenstern-Price, Las Pampas.

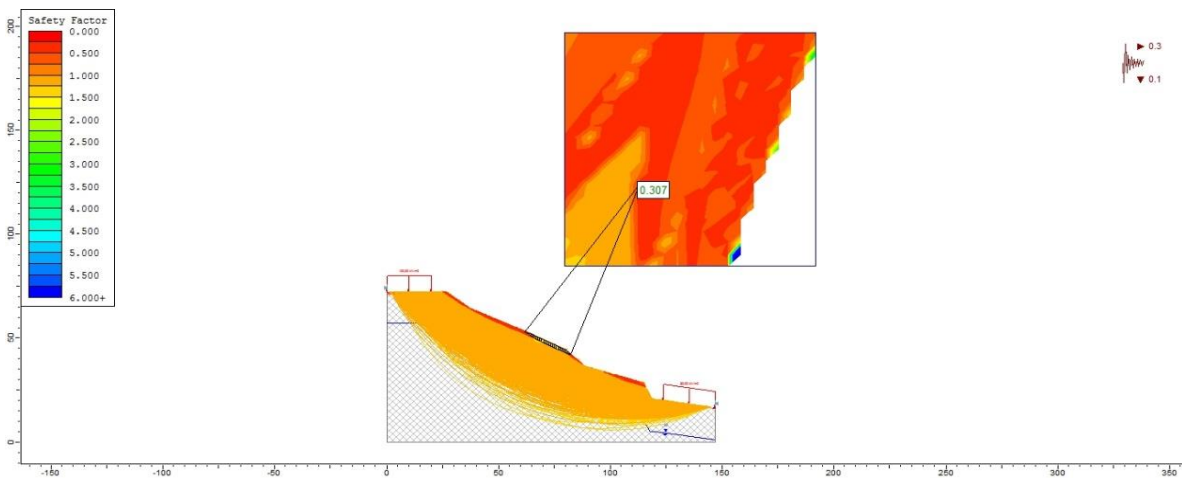


Figura 4.16. Análisis de estabilidad por método de Spencer, Las Pampas.

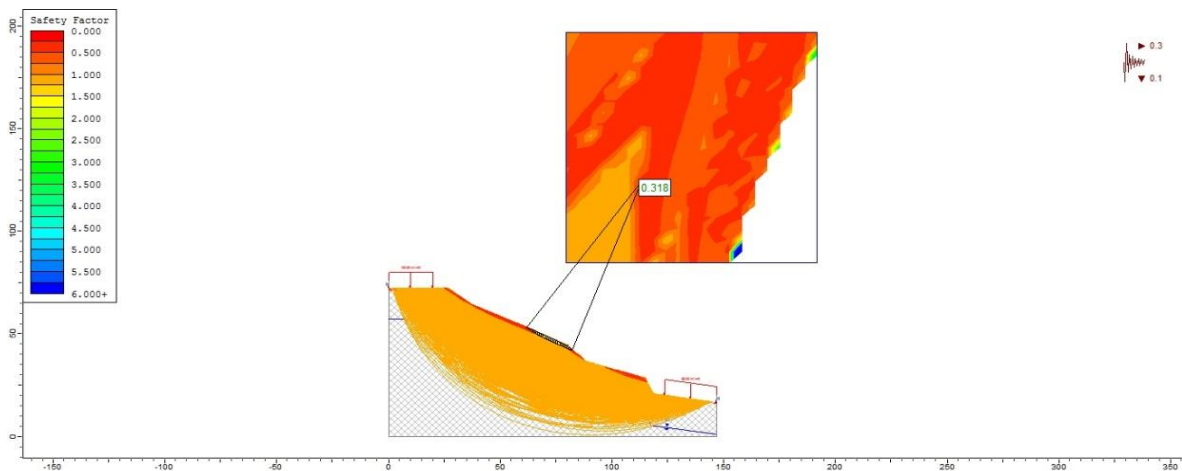


Figura 4.17. Análisis de estabilidad por método de Jambu Modificado, Las Pampas.

Las figuras muestran los posibles planos de falla y su factor de seguridad, donde se aprecia que la capa superficial es la que se movería ladera abajo, teniendo como plano de falla la roca altera. Sin embargo, se puede apreciar que a mayor profundidad se presentan valores de factores de seguridad entre 1.5, con inestabilidad intermedia.

De acuerdo a estos resultados se considera el área de las Pampas como una ladera inestable, la cual está directamente afectada por los factores condicionantes (pendiente, condiciones geológicas principalmente por la litología grado de alteración y fracturamiento en la roca lutita, propiedades físico mecánicas, nivel del agua freática) y los factores desencadenantes como precipitaciones y sismos. Otro factor muy importante son los elementos expuestos como las construcciones de casas en el pie de la ladera y construcciones importantes en la parte superior.

Resultados del análisis de estabilidad en el sector del Barrio Pedro Joaquín Chamorro

En esta zona se encontró un solo tipo de material en este caso lutita bien fracturada y se evidenció la presencia del nivel freático a 2m de profundidad. Parámetros que fueron utilizados en la corrida del programa. Es importante mencionar que en esta zona existe mucha preocupación de los habitantes, ya que a simple vista se evidencian caídas de rocas las cuales podrían dañar la estructura. Los métodos de análisis arrojaron factores de seguridad bajos, considerándose una zona inestable.

Los métodos de Jambu corregido (Figura 4.15) y Morgenster-Price (Figura 4.16) presentaron valores de factores de seguridad de 0.53. El método de Spencer (Figura 4.17) proporcionó un factor de seguridad de 0.52.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

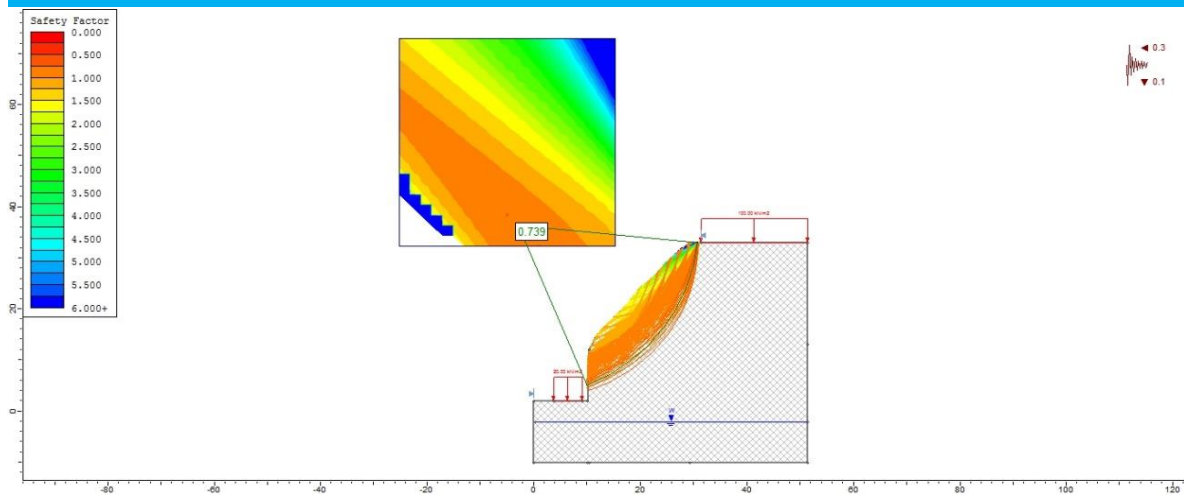


Figura 4.18. Método Jambu corregido, Pedro Joaquín Chamorro.

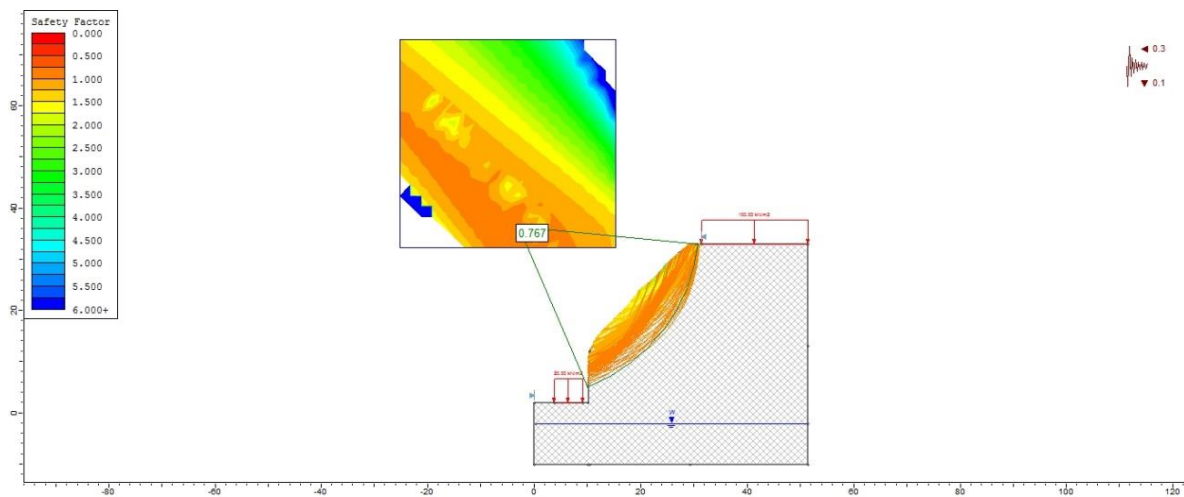


Figura 4.19. Método Morgenster-Price, Pedro Joaquín Chamorro.

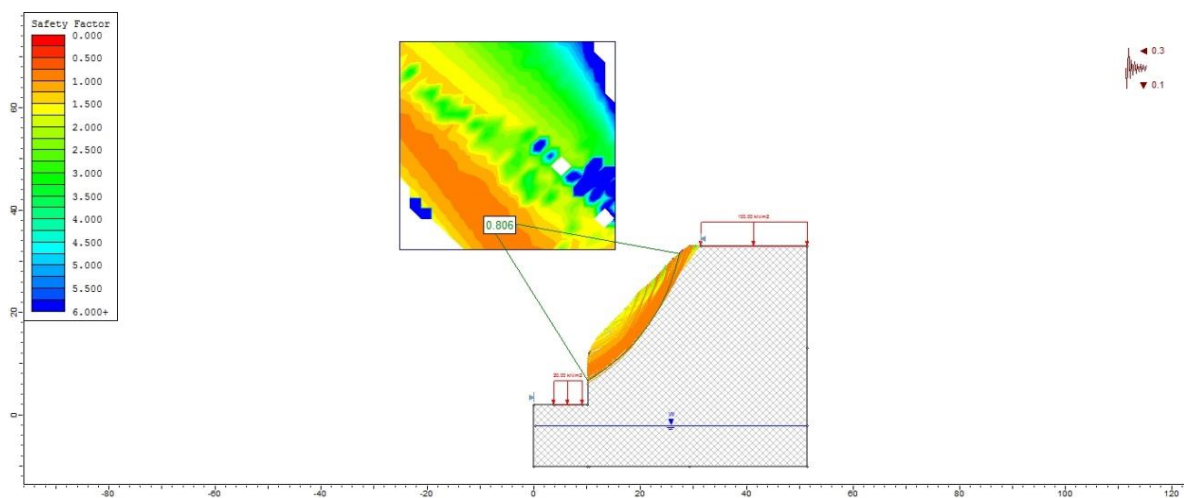


Figura 4.20. Método Spencer, Pedro Joaquín Chamorro.

Caracterización de indicadores cinemáticos en zonas potencialmente inestables a movimientos de masa en el área de San Juan del Sur, Departamento de Rivas

Los resultados nos indican que la ladera en el Barrio Pedro Joaquín es inestable, en todos los métodos se presentan valores de factores de seguridad menores a la unidad, esta zona afectada principalmente por el fracturamiento del material, fuertes pendientes y materiales débiles.

En este sitio se considera la amenaza por desprendimiento muy alta, ya que a simple vista se puede apreciar que el material se está desprendiendo, lo que valida el modelamiento de la ladera en SLIDE.

Tanto en las pampas con el Barrio Pedro Joaquín los taludes son inestables y es preocupante como la población se expande tanto en la parte inferior como superior de los taludes, no prestando atención en esta problemática.

4.1.5 Zonificación de la amenaza por movimientos en masa en San Juan del Sur

Para realizar la zonificación del municipio de San Juan del Sur se utilizó indicadores de campo como el estado de la roca, la presencia de estructuras geológicas, geomorfología, actividades antrópicas, falta de vegetación en las laderas, testimonio de los pobladores, además de tomar en cuenta el estudio geotécnico de las zonas las Pampas y Pedro Joaquín Chamorro, ambos barrios se seleccionaron ya que representan a gran escala la problemática del municipio en general.

Se cartografió las evidencias físicas de todos estos parámetros y se determinó el campo de acumulación de las rocas, las cuales se encuentran en la base del talud, estos depósitos van desde flujo de detritos en la mayoría de los puntos visitados, hasta desprendimiento de bloques un ejemplo de esto se da en el Mirador del Cristo de la Misericordia. Algo importante a tomar en cuenta fue la medición de la distancia de viaje de flujos, rocas y bloques lo cual se plasmó en los polígonos de amenaza dentro del mapa de zonificación (Figura 4.21), para determinar esta distancia se tomó como base la geometría de la ladera, lo cual en la mayoría de los casos son sub verticales a verticales, ocasionando que el desprendimiento no recorra grandes distancias.

El mapa de amenaza refleja zonas que presentan características similares de frecuencia y de intensidad del evento, representada cada una con el color correspondiente, ya que no hay datos exactos para determinar el cálculo de probabilidades o frecuencias, este se estimó en base a la observación directa de campo

Los polígonos con amenaza alta y media plasmados en el mapa representan zonas de amenaza actual, considerando el principio de actualismo geológico, se asumió que estos polígonos son definidos como zonas de alta-media amenaza según correspondan.

Se espera que este mapa sea utilizado para los procesos de planificación y gestión territorial donde se cumpla con un reglamento donde las personas no pueden asentar sus viviendas o edificaciones en lugares con amenazas altas-medias sin antes realizar medidas preventivas.

Mapa de Zonificación de amenaza ante movimientos de masa

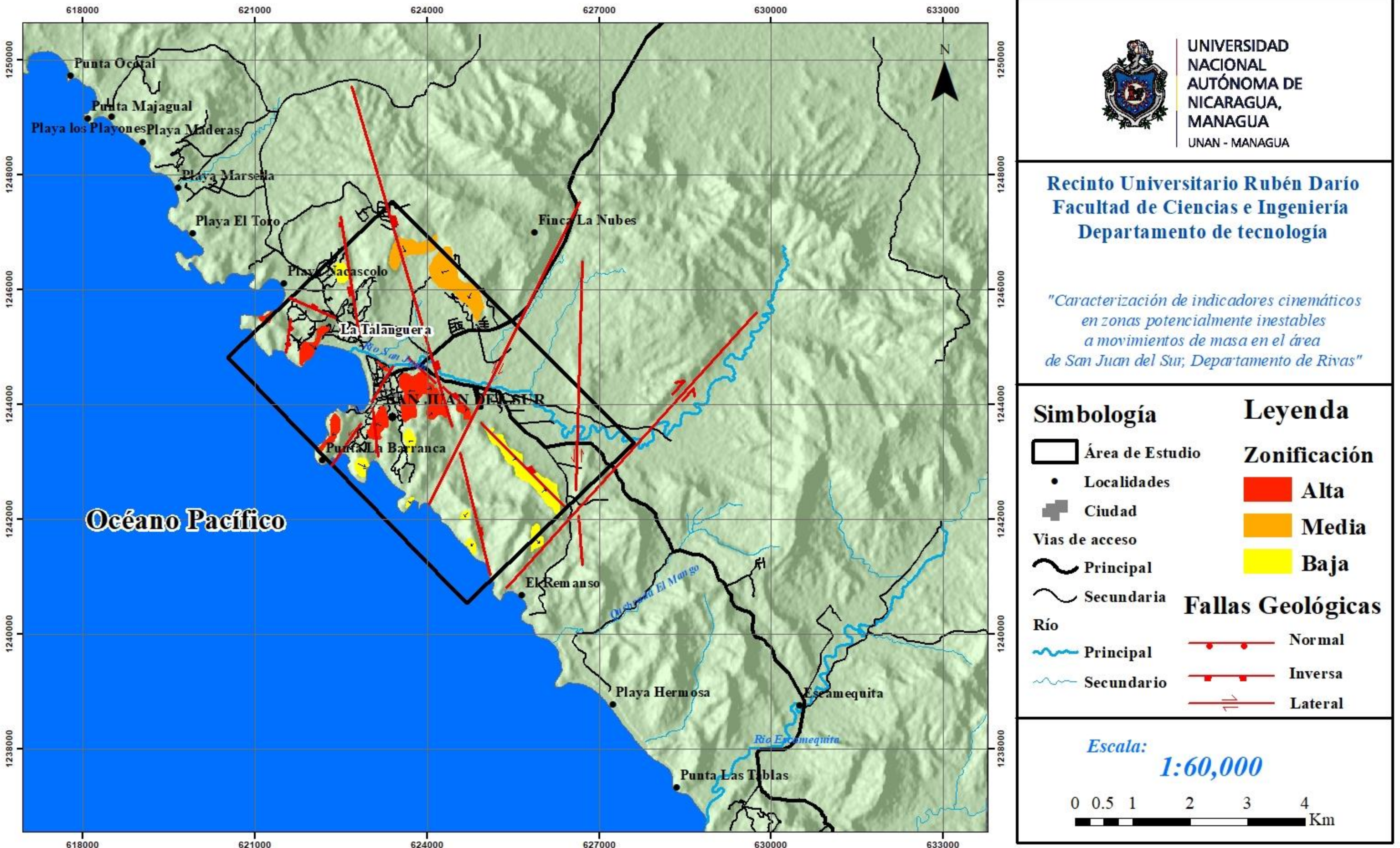


Figura 4.21. Mapa de Zonificación de amenaza ante movimientos de masa.

5 Capítulo

5.1 Conclusiones

Las conclusiones de este estudio están basadas en los resultados y discusión presentados previamente, en las cuales se concluye lo siguiente:

1. Los indicadores cinemáticos caracterizados dentro del área de estudio fueron: Pliegues, stepover o sigmoides, estructuras R y R' y arreglos de fracturas tales como, fracturas paralelas, curvilíneas, relay, terminación en abanico y sistemas anastamizados.
2. Los tipos de fallas identificados para el municipio correspondieron a fallas normales, inversas y laterales, estas forman sistemas conjugados.
3. Estructuralmente, el municipio de San Juan del Sur es controlado por tres sistemas de fallas: N-O, N-E y N-S, en el cual el sistema noroeste es el más antiguo, seguido del sistema norte-sur, siendo el más joven el sistema de fallas noreste.
4. Se determinó que la litología del municipio de San Juan del Sur está compuesta por tres unidades de rocas entre las cuales hay rocas sedimentarias detríticas tales como: lutitas, areniscas volcano-clásticas, areniscas fosilíferas y rocas carbonatadas tipo calizas.
5. Los afloramientos rocosos caracterizados presentan un alto grado de alteración y fracturamiento, además que la mayoría de las rocas tienen componentes ferromagnesianos, los cuales hacen posible una rápida meteorización y erosión.
6. Se elaboró un mapa de inventario donde se clasificó los tipos de movimientos de terreno encontrando que los principales son: Caída de detritos, rocas, bloques y deslizamientos.
7. Se realizó un análisis de estabilidad de taludes en los barrios Las Pampas y Barrio Pedro Joaquín Chamorro, donde se determinó que son zonas propensas a movimientos del terreno, ya que se obtuvieron factores de

seguridad menores a uno, esto significa que los esfuerzos actuantes en la ladera superan a los esfuerzos resistentes, por tanto, se ha clasificado como zonas de alta amenaza.

8. En el área de estudio los factores que condicionan los movimientos de terreno son: el estado de alteración la roca, los cambios en la geometría original de la ladera realizados para ejecutar construcciones de viviendas y/o edificios, el alto de grado de fracturamiento en las rocas, la geomorfología del área, el mal uso del suelo y la fácil infiltración del agua en las rocas y suelos debido a los escasos de vegetación.
9. Según el mapa de zonificación, se establecieron áreas de alta amenaza donde, el mirador del Cristo de la Misericordia, Barrio Camilo Ortega, Pedro Joaquín Chamorro, Las Pampas y puerto del municipio presentan esta problemática.

5.2 Recomendaciones

1. Para las futuras construcciones proyectadas en zonas altas, se recomienda realizar con anterioridad estudios geológicos, geotécnicos y sísmicos para conocer las condiciones del terreno y saber si este es óptimo para la edificación.
2. Evitar la deforestación de laderas, ya que deja expuesta las rocas y suelo a los agentes atmosféricos, los cuales actúan sobre ellas debilitándolas ocasionando movimientos de terreno.
3. Antes de realizar un corte de terreno se recomienda realizar estudios de estabilidad de taludes y así evitar pendientes totalmente verticales en las cuales se originan movimientos de masa.
4. Tomar en cuenta los mapas de zonificación e inventario de movimientos de masa a la hora de realizar la construcción de edificaciones, para contribuir al ordenamiento territorial de la zona evitando que la población se asiente en sitios de alta amenaza.
5. Dar a conocer a la población en general las zonas de alto riesgo ante movimientos de terreno y las medidas para la mitigación y prevención, mediante asambleas municipales, mapas, rótulos, señalamientos, panfletos, poster, etc.
6. De acuerdo al análisis realizado en este estudio, se sugiere no continuar desarrollando construcciones en la parte superior y pie de laderas en los barrios, Pedro Joaquín Chamorro, Las Pampas, Camilo Ortega, Zacarías Mora y el área del Mirador del Cristo de la Misericordia, a menos que se realicen estudios de estabilidad de terreno y que estos avalen que las condiciones del sitio son aptas para desarrollar obras ingenieriles.
7. En áreas con laderas verticales expuestas se recomienda protegerlas de la infiltración excesiva de la parte superior y evitar procesos erosivos utilizando geotelas o vegetación (grama), además de implementar un sistema de drenaje efectivo para evitar la introducción de las aguas en el suelo.

8. En los barrios Pedro Joaquín Chamorro y Camilo ortega se recomienda botar todas las rocas desprendidas de las paredes de laderas para evitar que estas caigan sobre estructuras ubicadas al pie.
9. Mantener informada a la población expuesta, sobre rutas de evacuación para que se trasladen en un tiempo prudencial en caso de un evento desencadenante de movimientos de terreno.
10. A las autoridades pertinentes se les recomienda mantener actualizadas las rutas de evacuación y los planes de evaluación de riesgo municipal, para así dar respuesta a la población de manera inmediata ante cualquier situación que se presente.

5.3 Bibliografía

- ◆ Astorga, A., (1987): El Cretácico Superior y el paleógeno de la vertiente pacífica de Nicaragua meridional y Costa Rica septentrional: Origen, evolución y dinámica de las cuencas profundas relacionadas al margen convergente de Centroamérica.
- ◆ Bice, D. C., (1985). Quaternary volcanic stratigraphy of Managua, Nicaragua.
- ◆ Bishop, A. (1960). Stability Coefficients for Earth Slopes (Vol. 5 Geotechnique). New York.
- ◆ INTUR y BID, 2013., Actualización del Plan de Ordenamiento y Desarrollo Urbano de San Juan del Sur.
- ◆ CIGEO, 2015., Estudio de inestabilidad de terrenos en la zona de El Comal y áreas aledañas en Bonanza, RACCN.
- ◆ Copons Llorens, R., & Tallada, A. (2009). Movimientos de Ladera "LandsLides". Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 284-294.
- ◆ Darce, M., Duarte, M. (2002). Geología de la cuenca Sandino.
- ◆ Dengo, G., (1969), Problems of tectonic relations between Central America and the Caribbean, Transm Gulf Coast Assoc. Geol.Soc., 29, 311-320.
- ◆ Denyer, P. (2010). Geología y Geotectónica de América Central y el Caribe. San José.
- ◆ Díaz, O, Mejía, R y Ulloa, H (2018). Evaluación de estabilidad de ladera, por cargas estáticas y dinámicas. En la comarca de Pochocuape, Managua Nicaragua.
- ◆ Dinarte, A, Vásquez, F y Ulloa, H (2017). Evaluación de estabilidad de talud en tres sectores de la Comarca Jocote Dulce.
- ◆ Elming et al., (2001) - Paleomagnetic Tertiary rocks in Nicaragua.

- ♦ Elming, S., Widenfalk, L., & Rodríguez, D. (1998). Investigación científica en Nicaragua. Proyecto conjunto Suecia-Nicaragua. Lulea.
- ♦ Fagginer Auer W. (1942) Rapporto riassuntivo della Paleontologia della zona della Costa Pacífica. Nicaragua: Unpublished manuscript.
- ♦ Frischutter., (2002) Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images: Geofísica internacional (Vol. 41).
- ♦ Garayar, Julio. 1971. Geología y depósitos de minerales de una parte de las mesas de Estelí, cordillera norte y montañas de Dipilto, Catastro No.10, Managua-Nic.
- ♦ García - Palomo A (2002). Vulcanismo y Geología Estructural de la Región de Apan Estados de Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y México. Tesis de Doctorado Ciencias Vulcanología. Universidad Autónoma de México.
- ♦ García Rodríguez, 2012. Biología y Geología.
- ♦ Geo-studio. (2004). Manual computacional Slope/W Y Quake/W.
- ♦ Guido, O, Fariña M y Ulloa,H (2014). "Evaluación de estabilidad de talud inducida por cargas estáticas y dinámicas en la Loma chico Pelón, Managua-Nicaragua.
- ♦ Hayes, C.W. (1898). Physiography and geology of region adjacent to the Nicaragua canal route: Geol. Soc. Am. Bull., v. 10 pp. 285-448.
- ♦ Hodgson., G., (2000). Geología Regional de Nicaragua. Managua.
- ♦ Hunting Geology and Geophysics Ltd. (1971). Side looking Radar Survey of Nicaragua. W estinghouse Electronic Corporation. Baltimre USA.
- ♦ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER, (2001) Amenazas Naturales de Nicaragua.
- ♦ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER. (1971). Hoja geológica de San Juan del Sur 3049 IV escala 1:50,000.

- ♦ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER. (2004). Mapa Geológico de Nicaragua. Escala 1: 750,000.
- ♦ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales INETER. (2005). Inestabilidad de Ladera.
- ♦ Kuang, J., (1971). Estudio geológico del pacifico de Nicaragua. Catastro e inventario de Recursos Naturales. Informe 10.
- ♦ McBirney, A & Williams, H., (1965). Volcanic history of Nicaragua. Univ. California public Geological Sciences.
- ♦ Mercado Montilla, A., 2016. Metodología para la zonificación de la amenaza por movimientos en masa desencadenados por la sismicidad.
- ♦ Ministerio de energía y minas MEM (2002). Geología de la Cuenca Sandino.
- ♦ Ministerio de energía y minas MEM (2007). Mapa de la Cuenca Sandino.
- ♦ Morgenstern, R., & Price, E. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. Geotechnique.
- ♦ Parsons Corporation, (1972). The geology of western Nicaragua: Nicaragua, Tax improvement and Natural Resources Inventory Project, Final Technical Report Volume IV.
- ♦ Paz Rivera, (1965). Informe preliminar del estudio de Reconocimiento geológico de la costa del Pacífico.
- ♦ Peacock, S. M., Van Keken, P. E., Holloway, S. D., Hacker, B. R., Aber. G. A., and Ferguson, R. L., (2005), Thermal structure of the Costa Rica-Nicaragua subduction zone: physics of the Earth and Planetary Interiors, no. 149, p. 187-200.
- ♦ Peralta P, 2006. Estudio de mecánica de suelos y estabilidad de taludes proyecto presa de colas “AGUAS CLARAS” Bonanza, RAAN.
- ♦ Richard J. Lisle, (2004). Geological Structures and Maps.

- ♦ Rubilar, H. N. (1999). Apuntes de Geología Estructural, Estructuras Frágiles. Antofagasta.
- ♦ SAREC, INMINE, SGAB, (1986-1991). Nueva estratigrafía de rocas volcánicas terciarias de la región central de Nicaragua.
- ♦ Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres SINAPRED (2017). Plan de Respuesta Municipal con Enfoque MULTIAMENAZA San Juan del Sur 2017.
- ♦ Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres SINAPRED, (2005). Reporte sobre las Amenazas, Vulnerabilidad y Riesgos ante Inundaciones, Deslizamientos, Actividad Volcánica y Sismos en el municipio de San Juan del Sur.
- ♦ Spring, (1999). Introduction to Structural Geology.
- ♦ Sten-Åke Elmg, Lennart Widenfalk y Dionisio Rodríguez (1981-1991) Investigación Geocientífica en Nicaragua.
- ♦ Strauch, W., (2000). Actividad sísmica entre Masaya, Laguna de Apoyo y Granada en Julio del 2000.
- ♦ Tarbuck, E., & Lutgens, F., (2005). Ciencias de la Tierra. Madrid: Migue Martin-Romo.
- ♦ Tecnológico de Antioquia I.U, (2017) Movimientos en masa.
- ♦ Tolson G., (1996). Catálogo de Indicadores Cinemáticos en Rocas Cizalladas. Depto. de Paleomagnetismo. GEOS, Unión Geofísica Mexicana.
- ♦ Ulloa, H. (2011). Stress- strain behaviour of the soils of Managua city due to seismic cyclic loading. Managua.
- ♦ UNAM, (2015) Deformación de los materiales de la Corteza materiales de la Corteza.

- ♦ Van Wyk de Vries B. (1993), Tectonics and magma evolution of Nicaraguan volcanic systems.
- ♦ Weinberg, R. F, (1992). Neotectonic Development of Western Nicaragua. En: Elming, S., Widenfalk, L., & Rodríguez, D., 1998. Investigación científica en Nicaragua. Proyecto conjunto Suecia-Nicaragua. Luleå.
- ♦ Wilson, T. C., (1941). Summary of geology and stratigraphy of San Rafael-El Carmen.
- ♦ Woodward – Clyde Consultants, (1975). Investigation of active faulting in Managua, Nicaragua, and vicinity, Managua.
- ♦ Zoppis, B y Del Guidice. (1958). Geología de la Costa del Pacífico de Nicaragua. Boletín del Servicio Geológico Nacional (Nicaragua) No.2.

5.4 Anexos

Anexo 1. Tabla de Indicadores Cinemáticos

Punto	X	Y	msnm	Indicadores Cinemáticos										
				Arreglo para fracturas						Estructuras		Stepover o		
				Fracturas paralelas	Fracturas conjugadas	Fracturas Curvilineas	Fracturas Relay	Terminación en abanico	Sistemas anastomasados				Riedel	Pliegues
P1	623039	1242979		✓	✓	✓				✓		✓		
P2	623203	1244731		✓		✓								
P3	622990	1243599		✓						✓				
P4	624791	1245505						✓						
P5	621871	1244711		✓	✓	✓				✓	✓		✓	✓
P6	622898	1243454		✓		✓				✓				
P7	623014	1243558			✓		✓			✓				
P8	623110	1243905		✓										
P9	623144	1243981		✓		✓				✓				
P10	623364	1244516		✓		✓								
P11	623677	1244501		✓										
P12	623843	1244614		✓						✓			✓	✓
P13	623498	1244562		✓										
P14	623203	1244731		✓										
P15	623947	1244616		✓										
P16	622106	1245234		✓						✓				
P17	625366	1240747		✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓